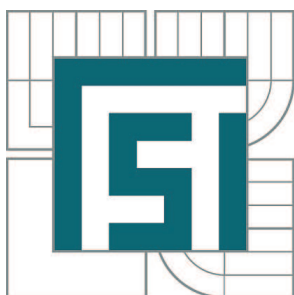


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE VÝROBY TĚŽKÝCH OCELOVÝCH ODLITKŮ

OPTIMIZATION OF HEAVY STEEL CASTINGS MANUFACTURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VÁCLAV MALÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV ŠENBERGER,
CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Václav Malý

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace výroby těžkých ocelových odlitků

v anglickém jazyce:

Optimization of heavy steel castings manufacture

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě zejména středně těžkých a těžkých odlitků z oceli je obtížné dosáhnout požadované povrchové a vnitřní jakosti odlitku přímo po odlití. Vnitřní a povrchová jakost odlitku je dosahována opravami vad, které zvyšují náklady a prodlužují výrobní časy. Proto je žádoucí optimalizovat výroby forem a způsob odlévání tak, aby byl vznik vad minimalizován.

Práce je zadána pro podmínky slévárny Vítkovice Heavy Machinery a. s. a bude řešena ve spolupráci s tímto podnikem.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je sledovat výrobní technologii u vybraných odlitků od přípravy formovacího materiálu a tekutého kovu, přes výroby forem a odlévání po čistírnu. Příčiny vad zjištěné po odlití analyzovat na základě informací o výrobě odlitku. Přínosem práce bude výběr parametrů výroby, které mají vliv na tvorbu uvedených vad, jejich kvantifikace a využití ke statistické analýze. Na základě statistické analýzy a rozboru fyzikálně-chemických zákonitostí reakce kovu s atmosférou a formou přispět k objasnění příčin uvedených vad a formulovat nápravná opatření.

Seznam odborné literatury:

1. ŠENBERGER, J., aj. Metalurgie oceli na odlitky. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2008. 310 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
2. TURGDOGAN, ET. Fundamentals of steelmaking. 1. vyd. London: The Institute of materials, 1996. 331 s. ISBN 1861250045.
3. ELBEL, T., aj. Vady odlitků ze slitin železa. 1. vyd. Brno: Matecs, 1992. 332 s.
4. ZÁDĚRA, A., ŠENBERGER, J. a ELBEL, T. Reoxidační pochody při odlévání slitin železa. 1. vyd. Brno: Česká slévárenská společnost, 2009. 135 s. ISBN 978-80-02-02192-6.
5. ELBEL, T., et al. Study of the occurrence suppression of metal reoxidation in ferrous castings. Proceedings of the 67th World Foundry Congress. Harrogate, 2006, p. 94/1–94/10.
6. ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A. a ELBEL, T. Aktivita kyslíku v litinách během tavení a odlévání. Slévárenství. roč. 53, č. 7–8, 2005, s. 308–312. ISSN 0037-6825.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se v první části zabývá častými vadami těžkých ocelových odlitků. Na velmi těžkých odlitcích nosných kruhů cementářských pecí byly provedeny experimenty s cílem snížit spotřebu tekutého kovu a zvýšit vnitřní jakost odlitků. Tohoto pokroku bylo dosaženo zavedením nových technologií, tato práce použité technologie popisuje a následně srovnává.

Klíčová slova

Těžké ocelové odlitky, optimalizace, nosné kruhy, vady odlitků, kontaktní chladítko.

ABSTRACT

In its first part the work deals with the frequent defects of heavy steel castings. Experiments were carried out in very heavy bearing rings casting of cement kilns in order to reduce consumption of liquid metal and to increase the internal quality of castings. The progress was achieved by introducing new technologies; this thesis describes the technologies used and subsequently performs their comparison.

Key words

Heavy steel castings, optimization, bearing rings, casting defects, contact cooler.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MALÝ, V. *Optimalizace výroby těžkých ocelových odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 55 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma optimalizace výroby těžkých ocelových odlitků vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně 3.6.2011.....
Václav Malý

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Jaroslavu Šenbergerovi, CSc a Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Poděkování patří také slévárně VHM a.s., která umožnila přístup k důležitým informacím, zejména děkuji Ing. Jiřímu Pluháčkovi za jeho vstřícnost a obětavost při poskytování informací.

Obsah

Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
1. Úvod	9
2. Cíl práce	10
3. Výrobní procesy.....	11
3.1 Výroba tekutého kovu.....	11
3.1.1 Elektrická bloukové pece (EOP).....	11
3.1.2 Pánvová pec (LF)	11
3.1.3 Vakuové stanice (VD/VOD).....	12
3.2 Příprava formovací směsi	13
3.3 Vtoková soustava	13
4. Vady ocelových odlitků	15
4.1 Rozdělení vad.....	15
4.2 Úvod určování vad odlitků	17
4.3 Postup určení příčiny vady	18
4.4 Shrnutí.....	20
5. Časté vady ocelových odlitků	21
5.1 Sekundární struskovitost	21
5.1.1 Definice vady.....	21
5.1.2 Příčiny vzniku	21
5.2 Lasturový lom	23
5.2.1 Definice vady.....	23
5.2.2 Zabránění vzniku vady	23
5.3 Stvolové vycezeniny	24
5.3.1 Definice vady.....	24
5.3.2 Identifikace vady	24
5.3.3 Vliv metalurgických a technologických faktorů	24
5.3.4 Opatření proti vzniku stvolových vycezenin.....	25
5.4 Praskliny po upálení nálitku	26
5.5 Trhliny.....	26
5.6 Bubliny.....	27
5.6.1 Popis vady.....	27
5.6.2 Endogenní bubliny	27
5.6.3 Identifikace vady	28
6. Nosné kruhy cementářských pecí.....	29
6.1 Nosný kruh č.1 – technologie bez spodního chlazení.....	29
6.1.1 Formování	29
6.1.2 Lití kovu	30
6.1.3 Zjištěné vady	31
6.2 Nosný kruh č.2 – technologie s použitím kontaktních chladítek	32
6.2.1 Úpravy provedené zavedením nové technologie	32
6.2.2 Formování	33
6.2.3 Chlazení odlitku č. 2	35
6.2.4 Lití kovu	36

6.2.5 Měření teplotního pole.....	36
6.2.6 Porovnání naměřených teplot s výsledky simulací.....	37
6.2.7 Shrnutí výsledků.....	40
6.2.8 Zjištěné vady	41
6.2.9 Masivní trhliny	41
6.2.10 První možná příčina vzniku trhliny	43
6.2.11 Druhá možná příčina vzniku trhliny	44
6.2.12 Navržená opatření	45
6.3 Nosný kruh č.3 - technologie s použitím nekontaktních chladítek	46
6.3.1 Formování	46
6.3.2 Lití kovu	47
6.3.3 Měření teplotního pole.....	48
6.3.4 Porovnání naměřených teplot s výsledky simulací.....	49
6.3.5 Shrnutí výsledků.....	51
6.3.6 Zjištěné vady	52
6.4 Spotřeba tekutého kovu a vnitřní struktura	52
6.4.1 Kruh č. 1	52
6.4.2 Kruhy č. 2,3	52
6.4.3 Porovnání vnitřní struktury	53
7. Závěr	54
Seznam použitých zdrojů	55

1. Úvod

V roce 2009 bylo vedením společnosti VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s. rozhodnuto zaměřit další vývoj v oblasti metalurgie na zvyšování užité hodnoty výrobků a na přípravu výroby nejnáročnějších výrobků pro energetiku. Tímto způsobem pak čelit konkurenci zejména nových výrobců z rozvíjejících se zemí. U vyráběných těžkých odlitků se někdy vyskytují vady, které mohou při zvýšeném namáhání vést k odstavení celého strojního zařízení nebo mohou způsobit úplné porušení. Proto je zvýšení vnitřní jakosti těžkých odlitků velmi aktuální a to jak z hlediska výrobce, tak i uživatele. Pro výrobce je z hlediska blízké budoucnosti jakost limitujícím faktorem pro získání zakázek. Rozvoj se zaměřuje na metody, které mohou ovlivnit primární krystalizaci kovu a to jak úpravou složení oceli, tak i postupy ke zvýšení rychlosti chladnutí odlitku při současném zpomalení odvodu tepla v oblasti nálitku. Zmenšení nálitku je významným faktorem pro urychlení chladnutí celého odlitku a vede ke značným finančním úsporám.

Byly zahájeny experimenty s použitím velmi hmotných chladítek. Tento vývoj je časově náročný, protože získání výsledků u jednoho odlitku trvá více než 6 měsíců. K řešení výše uvedených problémů byla získána finanční podpora v rámci projektů MPO a po projektem FR-TI1/09. Cílem projektu optimalizace používaných technologií je zvýšení využití tekutého kovu a zároveň snížení nákladů na čistírenské operace atd. [1].

Předložená diplomová práce řeší dílčí část projektu a to optimalizaci technologie výroby odlitků nosných kruhů. Jedná se o nejtěžší odlitky vyráběné v rámci společnosti.

U odlitků nosných kruhů litých starou technologií bylo využití tekutého kovu mírně nad 50 %. Dále se u nosných kruhů vyskytovalo množství vad v podnálitkové ploše. Pro zvýšení využití tekutého kovu byly navrženy technologie, které mají dosáhnout lepšího usměrnění tuhnutí, tímto způsobem snížit dosazovací vzdálenosti, zmenšení nálitku a snížení rizika výskytu vad.

2. Cíl práce

Cílem práce je sledovat výrobní technologii u vybraných odlitku od přípravy formovacího materiálu a tekutého kovu, přes výroby forem a odlévání. Příčiny vad zjištěné po odlití analyzovat na základě informací o výrobě odlitku. Určit výběr parametrů výroby, které mají vliv na tvorbu uvedených vad a jejich klasifikace. Přínosem práce bude hodnocení nových testovaných technologií z hlediska využití tekutého kovu, výskytu vad na odlitku a dalších parametrů, které ovlivňují jakost odlitku. Dalším přínosem bude ověření hodnot získaných simulací pomocí měření teplotního pole odlitků.

3. Výrobní procesy

Ve VHM a.s. je vyráběn široký sortiment značek ocelí, od uhlíkových, přes jakostní mikrolegované až po středně legované vysokojakostní oceli. Zcela ojediněle se vyrábí vysoko chromové oceli, nástrojové oceli, tvárná litina a vysoko uhlíková ocel [2].

3.1 Výroba tekutého kovu

3.1.1 Elektrická bloukové pece (EOP)

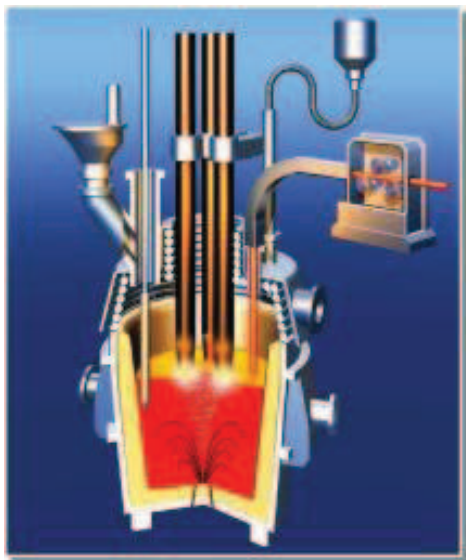
V ocelárně VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY jsou 3 tavicí agregáty. Nejpoužívanějším tavicím agregátem je EOP č.5, tato pec byla v roce 2006 modernizována a doplněna o trojici kyslíko-palivových hořáků pro zvýšení účinnosti. EOP č.5 má teoreticky maximální výkon 417 000 t/rok, tato hodnota převyšuje současnou produkci ocelárny více než 2x a pec č.5 dnes zajišťuje přibližně 90% produkce ocelárny. Průměrná doba jedné tavby je 80 min. [2].

Tavicí agregát	EOP č.3	EOP č.4	EOP č.5
Výrobce	Tagliata-VŽ	BBC-VŽ	VAI-FUCHS
Kapacita	12-18 t	45-55 t	65-75 t
Výkon	5 MW	12 MW	25 MW
Elektrody	300 mm	400 mm	500 mm

Tab 1. Tavicí agregáty v ocelárně VHM

3.1.2 Pánvová pec (LF)

V pánvové peci je nejprve dokončená desoxidace (Al-drát), následuje hluboké odsíření úprava strusky pomocí struskotvorných přísad (vápno, syntetická struska), dolegování na požadované chemické složení s ohledem na afinitní řadu (Al, Mn, Si). Poslední operace v pánvové peci bývá desoxidace strusky, pro snížení lehce odbouratelných oxidů, jako jsou (MnO, FeO) pomocí (Al, CaC₂). Pánvová pec v ocelárně VHM a.s. má 8 zásobníků na legující a struskotvorné přísady jako jsou (FeMn, FeSi, SiMn, FeCo 0,8%C, FeCo 0,15%C, FeV, FeMo, vápno). Průměrná doba zpracování oceli na LF je 60 min.



Obr. 1 Princip

Kapacita	80 t
Max. produkce	120 000 t/rok
Elektrický výkon	10 MW
Rychlost ohřevu	2-3 °C/ min
Průměr elektrod	300 mm

Tab 2. Parametry LF ve VHM

3.1.3 Vakuové stanice (VD/VOD)

Ocelárna je dále vybavena kesony pro vakuové zpracování oceli. Stanice se skládá z kesonu a pohyblivého víka. Kesony jsou konstruovány pro pánev o max. kapacitě 80 t. Hluboké vakuum pod 2 torr (167 Pa) je dosaženo přibližně po 20 min. Celková doba VD procesu je asi 60 min. Na výstupu je možné dosáhnout koncentrací H₂ méně než 1-1,2 ppm, N₂ méně než 50 ppm a S méně než 0.002-0.003 % (20-30 ppm). Vrstva strusky v peci bývá vysoká cca 10 cm. VOD proces se využívá u korozivzdorných ocelí s výstupní hodnotou obsahu C pod 0,03 %.



Obr. 2 Princip VD [3].



Obr. 3 Princip VOD [3].

Přibližně 10% vyrobené oceli přebírá slévárenský provoz, přičemž se vyrobená ocel uplatňuje především při odlévání velmi hmotných unikátních odlitků stojanů pro válcovny, nosných kruhů pro těžební velkostroje, berany pro lisy atp. U některých odlitků může dosahovat spotřeba tekutého kovu 250t, což odpovídá kapacitě čtyř až pěti pánví [2].

3.2 Příprava formovací směsi

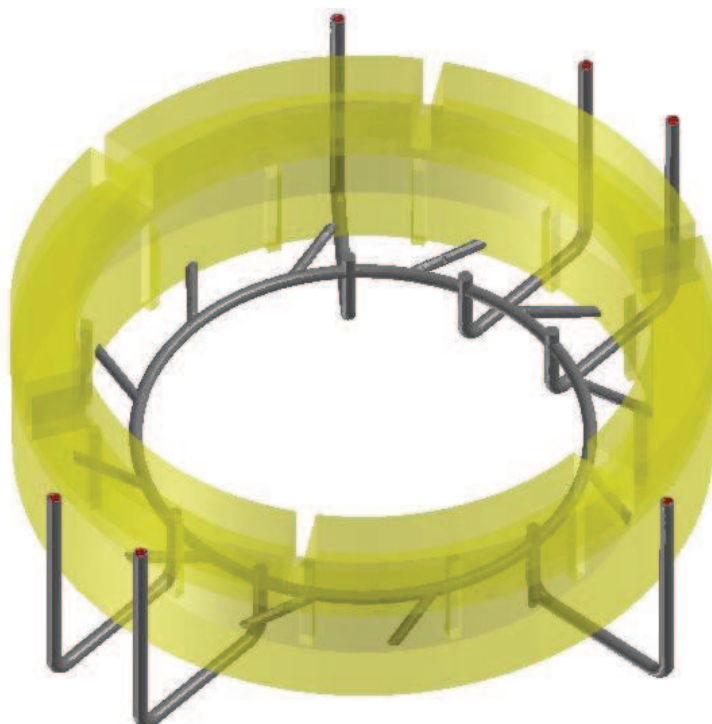
Formovna VHM a.s. zpracovává formovací směs pojenou furanovou pryskyřicí. Po vytvrzení dochází ke ztuhnutí směsi v celém průřezu formy, proto je nezbytné tuto směs regenerovat, aby se zrna ostřiva zbavily zbytků pojiva. Praxe mimo jiné ukazuje, že při použití vratných furanových směsí se mnohem méně vyskytují vady odlitků, jako jsou zálupy, zadrobeniny, penetrace apod., než když se používá výlučně nový písek. ST směsi mají řadu výhod, jako jsou: rychlá výroba formy, dobrá rozměrová přesnost, dobrá kvalita povrchu odlitků, vysoká pevnost formy po odlití a dobrá rozpadavost při uvolňování odlitku. K nevýhodám patří: vyšší ceny pojiv, nutnost rychlého zpracování a problémy s ekologií [4].

Druh směsi	Pryskyřice	Tvrdidlo [hm.%]
Křemenná směs	0,9	0,35
Chromitová směs	1,1	0,5

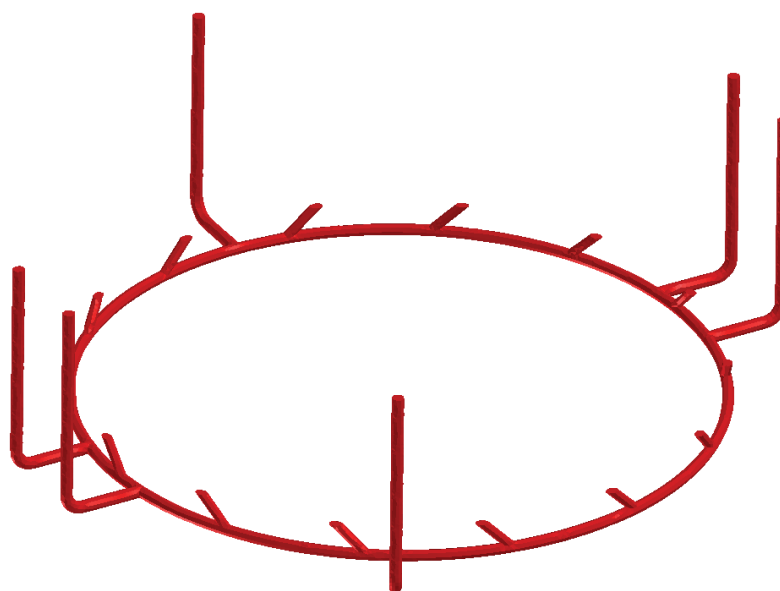
Tab 3. Dávkování pojiva a tvrdidla

3.3 Vtoková soustava

Vtoková soustava je složená z šamotových tvárnic o průměru 130 mm. U nosného kruhu s kontaktním chladičem je vtoková soustava zavedena do odlitku ze středu, viz *obr. 4*. U nosného kruhu s pukou a kruhu bez spodního chlazení je vtoková soustava zavedena do odlitku ze spodu viz *obr. 5*. Přibližná hmotnost plné vtokové soustavy zavedené ze spodu je 4,4 t. Přibližná hmotnost vtokové soustavy zavedené ze středu je 4,7 t.



Obr. 4 Odlitek nosného kruhu s kontaktním chladičom se vtokovou soustavou zavedenou ze středu.



Obr. 5 Vtoková soustava použitá u kruhu č.1 a č.3 (kruh bez spodního chlazení a kruh s puký).

4. Vady ocelových odlitků

4.1 Rozdělení vad

Termín vada odlitku má ve slévárenství podmíněný význam. Vadou odlitku se rozumí každá odchylka rozměru, hmotnosti, vzhledu, tvaru, struktury, celistvosti, chemického složení a vlastností (mechanických, fyzikálních) od příslušných norem, standardů, výkresů, a technických podmínek.

Vady na odlitcích mohou být zjevné nebo skryté. Zjevné jsou vady odhalitelné pouhým okem nebo jednoduchými pomocnými měřidly, kdežto skryté je možno zjistit až po obrobení odlitku či jinými speciálními měřidly, prostředky a zkouškami. Dále se vada odlitku dělí podle dohod mezi výrobcem a zákazníkem [5].

Přípustná vada

Přípustná vada je taková odchylka od sjednaných technických podmínek nebo příslušných norem, kterou tyto dokumenty připouštějí, aniž by požadovaly její odstranění u výrobce odlitku, pokud není zvláštními podmínkami výslovně zakázána [5].

Nepřípustná vada

Nepřípustná vada je taková odchylka od sjednaných technických podmínek nebo příslušných norem, kterou nelze odstranit opravou, nebo její oprava je podle sjednaných technických podmínek nebo příslušných norem nepřípustná (tzn. Je výslovně zakázána) [5].

Opravitelná vada

Opravitelná vada je taková odchylka od sjednaných technických podmínek nebo příslušných norem, jejíž oprava vhodným způsobem (např. zavařením, vyrovnáním, aj. technologiemi) je sjednanými technickými podmínkami nebo příslušnými normami dovolena nebo není výslovně zakázána [5].

Odstranitelná vada

Odstranitelná vada je taková odchylka od sjednaných technických podmínek nebo příslušných norem, kterou je nutno odstranit po dohodě s odběratelem odlitku jen zvláštními úpravami nepředpokládanými původním výrobním postupem (např. vypouzdřením odlitku, nepředepsaným tepelným zpracováním, speciálním opravným svařováním) [5].

Třída vad	Název třídy vad	Skupina vad	Název skupiny vad	Počet druhů
100	Vady tvaru rozměrů a hmotnosti	110	Chybějící část odlitku bez lomu	8
		120	Chybějící část odlitků s lomem	3
		130	Nedodržení rozměrů, nesprávná tvar	4
		140	Nedodržení hmotnosti odlitků	-
200	Vady povrchu	210	Přípečeniny	3
		220	Zálupy	3
		230	Nárasty Výronky	4
		240	Výronky	-
		250	Výpotky	-
		260	Zatekliny	3
		270	Nepravidelnosti povrchu odlitku	7
		280	Vady povrchové ochrany odlitku	-
300	Porušení souvislosti	310	Trhliny	3
		320	Praskliny	-
		330	Porušení souvislosti mechanickým poškozením	2
		340	Porušení souvislosti nespojením kovu	2
400	Dutiny	410	Bubliny bodliny	5
		420	Bodliny	-
		430	Odvařeniny	3
		440	Staženiny	6
500	Makroskopické vměstky a vady makrostruktury	510	Struskovitost	2
		520	Nekovové vměstky	6
		530	Makrosegregace a vycezeniny	4
		540	Broky	-
		550	Kovové vměstky	-
		560	Nevyhovující lom	-
600	Vady mikrostruktury	610	Mikroskopické dutiny	3
		620	Vměstky	-
		630	Nesprávná velikost zrna	-
		640	Nesprávný obsah strukturních složek	-
		650	Zatvrdlina, zákalka	-
		660	Obrácená zákalka	-
		670	Oduhličení povrchu	-
		680	Jiné odchylky od mikrostruktury	-
700	Vady chemického složení a vlastností odlitků	710	Nesprávné chemické složení	-
		720	Odchylky hodnot mechanických vlastností	-
		730	Odchylky hodnot fyzikálních vlastností	-
		740	Nevyhovující homogenita odlitku	-

Tab. 4 Vady odlitků [5].

Odlitek s nepřipustnou vadou nazýváme neshodný výrobek (zmetek), to je nepodařený kus. V závislosti na místě, ve kterém se vada zjistí, rozlišujeme zmetky vnější – zjištěné odběratelem a zmetky vnitřní – zjištěné před prodejem odlitku odběrateli [5].

4.2 Úvod určování vad odlitků

Správná identifikace vady je hlavní problém slevačů po celou dobu historie slévárenství. Umět řídit jakost ve slévárenství znamená umět určit neshody (vady) a znát postupy, jak těmto neshodám předcházet. K určení druhu vady však většinou slouží jen vizuální kontrola a proto se stává, že při posuzování vady posoudí dva kontroloři stejnou vadu odlišným termínem se zcela odlišným vznikem vady. K odstranění těchto omylů slouží systémem řízení jakosti [6].

Diagnostika

Diagnostika vady je klíčem ke snížení nákladů ve slévárně. Přitom je známo, že moderní přístup k zajištění výroby jakostních odlitků spočívá v prevenci, v předcházení vadám a plánování jakosti. Vady by se tedy neměly vyhledávat, ale v případě nutnosti je třeba znát racionální postupy identifikace vad odlitků a stanovení příčiny jejich vzniku [6].

Určování vad

Identifikace vad spojená se stanovením příčin jejich vzniku a se stanovením opatření k zamezení jejich výskytu a prevenci vychází nejdříve ze vzhledových a technologických znaků. Rozhodující význam mají informace ze shromážděných dat o podmínkách výroby. Odlitky nebo skupiny odlitků musí být patřičně označeny číselným nebo jiným znakem, v němž je zakódováno např. datum výroby, číslo tavby a jiné skutečnosti důležité pro zpětné určení původu vady. Popis vady → příčiny vzniku, opatření k zabránění vzniku, odstranění vady a způsob zjištění. Celkem můžeme zaznamenat 21 způsobů, pomocí nichž můžeme vady zjišťovat [6].

Skupina	poř. č.	název	četnost
prohlídka odlitku	1	vizuální kontrola odlitku (surového, hrubého, opracovaného)	70
	2	prohlídka odlitku (vady) pomocí lupy	11
měření, vážení	3	rozměrová kontrola (rýsování, kontrola podle šablon a etalonů)	4
	4	měření drsnosti povrchu odlitku (porovnání s etalonem)	2
	5	stanovení hmotnosti	1
defektoskopie	6	zvuková zkouška (poklepáním)	1
	7	prozařování odlitků (rentgenové, radioaktivní, neutronové)	10
	8	ultrazvuková defektoskopie (odrazová a průchodová metoda)	7
	9	magnetická prášková metoda (polévací, naprašovací, magnetofluorescenční)	2
	10	kapilární zkoušky (metoda barevné indikace a fluorescenční metoda)	4
	11	zkoušky propustnosti (tlakování odlitků)	4
chemické rozbor	12	stanovení chemického složení materiálu	5
	13	stanovení obsahu plynů	4
	14	rentgenová spektrální mikroanalýza	8
	15	metody určování fázového složení (difrakční, spektrální, termické, optické aj.)	5
strukturní rozbor	16	fraktografie	6
	17	stanovení makrostruktury (včetně Baumanova otisku)	4
	18	stanovení mikrostruktury světelnou mikroskopií	14
	19	elektronová mikroskopie (řádovací, transmisní)	4
rozbor vlastností materiálů	20	stanovení mechanických vlastností	1
	21	stanovení fyzikálních vlastností	1

Tab. 5 uvádí způsoby zjišťování vad rozdělené do hlavních šesti skupin [6].

U velmi těžkých odlitků se ke kontrole obvykle používají všechny skupiny zjišťování vad uvedené v tab. 5.

4.3 Postup určení příčiny vady

Podrobná klasifikace vad, si klade za cíl rozčlenit vady odlitků tak, aby se dala po identifikaci vady přímo a jednoznačně určit její příčina. Lze to tak učinit v případě vad tvaru, rozměrů a hmotnosti, jako je např. nedolití, špatná oprava formy, netryskaný odlitek, špatný model, nebo u povrchových vad prasklé jádro, prasklá forma, nedokonalý svar aj. Většina vad však může mít mnoho příčin – některé, jako např. zadrbeniny, sekundární struskovitost, povrchové

trhliny aj., mohou mít i desítky příčin. Postup při určování příčin vzniku vady je naznačen v obecném tvaru v tab.3 [6].

Schéma	postup činností	provádí
<pre> graph TD Start([]) --> D1{ } D1 -- NE --> C1((1)) D1 -- ANO --> D2{ } D2 -- NE --> C1 D2 -- ANO --> B1[] B1 --> D3{ } D3 -- NE --> C2((2)) D3 -- ANO --> B2[] B2 --> Doc[/ /] Doc --> Exp([EXPEDICE]) Exp --> Zmetek([ZMETEK]) Zmetek --> C1 C1 --> B3[] B3 --> B4[] B4 --> D4{ } D4 -- ANO --> C2 D4 -- NE --> C1 </pre>	posouzení vady podle vzhledu, norem, výkresů a sjednaných technických podmínek	kontrolor
	posouzení, zda se jedná o vadu zjevnou (ANO), nebo skrytou neshodu (NE)	kontrolor
	posouzení, zda lze vadu jednoznačně určit	kontrolor
	určení druhu vady (neshody), stanovení příčin, nápravná opatření	kontrolor nebo komise odborníků
	posouzení možnosti opravy vady (neshody) - lze, možno opravit?	kontrolor, technolog, mistr
	provedení opravy, úpravy	určená dílna
	provedení záznamu o použitých postupech, rozsahu, identifikace	mistr
	uvolnění odlitku zákazníkovi	kontrolor, expedient
	vyřazení odlitku, šrotace	kontrolor, mistr
	provedení doplňkových rozborů, destruktivní i nedestruktivní kontrola atd.	laboratoř, určená dílna
	posouzení výsledků rozborů, vzhledu vady, shody s předpisy	kontrolor nebo komise odborníků
	lze vadu nyní jednoznačně určit?	kontrolor nebo komise odborníků
	opakování celého postupu s využitím dalších kontrolních metod, externích odborníků apod. až do konečného rozhodnutí	

Tab. 6 Postup při určování příčin vzniku vady [6].

4.4 Shrnutí

K určení druhu vady odlitku slevačům většinou slouží pouze vizuální kontrola, a tak se často stává, že vadu může jeden pozorovatel označit jiným termínem než druhý kontrolor, který když se dívá na stejný odlitek, vysvětluje vadu jako jiný druh se zcela odlišnou genezí vzniku. K tomu, aby se těmto omylům předešlo, lze použít další metody kontroly vyžadující většinou složité přístroje a zdoluhavé postupy. Méně nákladným způsobem je však každodenní systematická práce ve slévárně, důslednost a pořádek, který je dán určitým systémem řízení jakosti [6].

5. Časté vady ocelových odlitků

Slévárenské vady se vyskytují u všech odlitků. Vady jsou odchylky od sjednaných technických a dodacích podmínek. Záleží na zákazníkovi a na sjednaných podmínkách, zda odlitek v případě vzniku vady, která není povolena v technických dodacích podmínkách přijme, nebo povolí nad ujednání její opravu [5].

5.1 Sekundární struskovitost

Při výrobě těžkých odlitků lze očekávat vznik této vady, která souvisí s podmínkami odlévání a s chemickými pochody ve vtokové soustavě a formě.

5.1.1 Definice vady

Otevřené nebo uzavřené dutiny ve stěně odlitku, které jsou částečně nebo úplně zaplněny struskou. Jedná se o silně heterogenní strusku a je doprovázena bublinami. Sekundární struska nemá nic společného se struskou vznikající vlivem metalurgických pochodů v tavících agregátech. Sekundární struska je produktem reoxidačních pochodů, které probíhají mezi proudem tekutého kovu, atmosférou v dutině formy a formovacím materiálem [5].

Protože struska má menší hustotu nežli tekutý kov, dochází k vyplouvání k hladině. Nacházíme ji tedy většinou v horních částech odlitku, nebo v místech, kde se přilepí ke stěně formy nebo jádra [5].

5.1.2 Příčiny vzniku

Proces reoxidace jednotlivých prvků probíhajících v tekuté oceli při vylévání z tavicího agregátu, z lící pánve a především při protékání formou je faktem, kterému nelze zabránit [5].

Reoxidační produkty vznikají kontaktem s vodní parou a v interakci s (SiO_2 , MnO , FeO). Některé prvky, například (Mn) se ve formě prakticky nevyskytují, obsah Mn v sekundární strusce je proto důkazem o reoxidaci tohoto prvku z tekutého kovu. Sloučeniny MnO a FeO jsou vysoce reaktivní s SiO_2 ve formě, tím dochází k naleptání SiO_2 a vytvářením složitých silikátů. Tyto silikáty jsou proudem kovu vneseny do dutiny formy, kde vyplavou na povrch a vytvoří vady povrchu, definovatelné jako typicky světlá místa sekundární struskovitosti na povrchu odlitku [5], [7].

Nejvýznamnějším faktorem pro vznik sekundární struskovitosti je obsah vodní páry v dutině formy během lití, z toho plyne, že při lití do organických forem je reoxidace podstatně menší než při lití do forem syrových. Z toho dále vyplývá,

že u syrových forem hrozí daleko větší riziko povrchových vad sekundární struskovitosti [7].



Obr. 6 Sekundární struskovitost na povrchu zvonového odlitku [7]

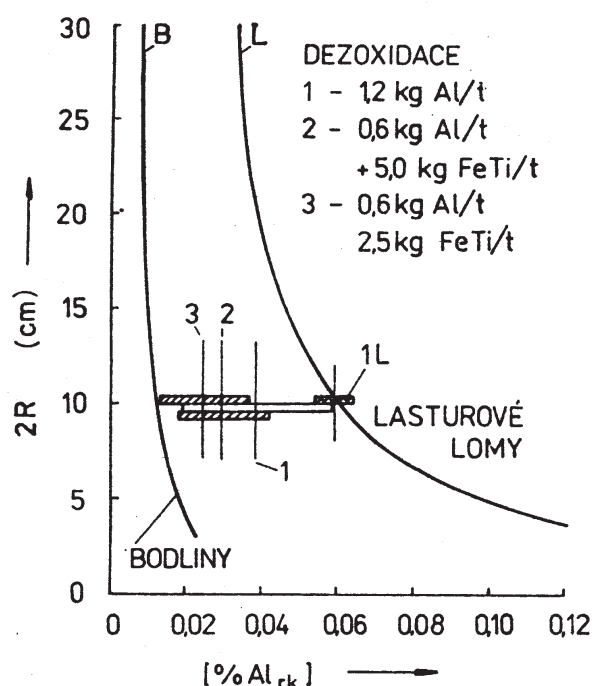


Obr. 7 Detail vady [7]

5.2 Lasturový lom

5.2.1 Definice vady

Lasturové lomy se vyskytují zejména u tlustostěnných odlitků. Při překročení obsahu hliníku se na lomových plochách začnou tvořit lesklé lasturové lomy. Zbytkový obsah hliníku se musí pohybovat v rozmezí určeném nebezpečím vzniku bublin v odlitcích při jeho nízké koncentraci a nebezpečím vzniku lasturových lomů při jeho vysoké koncentraci. Povolené rozmezí se s rostoucí tloušťkou stěny odlitku zužuje. Závislost mezi obsahem hliníku a tloušťkou stěny odlitku (vyjádřenou hodnotou směrodatné tloušťky stěny $2R$) je vyjádřen v grafu 1. [8].



Graf 1 Mezní křivky výskytu lasturového lomu a bodlin v závislosti na směrodatné tloušťce odlitku pro oceli s $C=0,28\%$ a $N=0,010\%$ [8]

5.2.2 Zabránění vzniku vady

Lasturový lom lze omezit prvky, které zjemňují primární austenitické zrno a tvoří s dusíkem nitridy stabilnější než nitrid hliníku. K těmto prvkům patří titan, zirkonium, niob, molybden a také síra. V praxi českých sléváren oceli je často používán k prevenci proti lasturovým lomům titan. Při kombinované dezoxidaci hliníkem a titanem váže hliník kyslík a titan dusík. Titan působí substituční zpevnění matrice a zvyšuje sklon ke vzniku trhlin. Koncentrace titanu v oceli se doporučuje vyšší než $0,040\%$, pro těžké odlitky vyšší než $0,030\%$ [8].

5.3 Stvolové vycezeniny

5.3.1 Definice vady

Stvolové vycezeniny, známé rovněž jako A-vycezeniny, jsou specifickou vadou, která úzce souvisí se selektivním charakterem tuhnutí masivních odlitků. Vycezeniny jsou shluky ztuhlé matečné taveniny obohacené mezi dendrity příměsemi. Charakteristické pásy stvolových vycezenin začínají v určité hloubce pod povrchem odlitku, tato hloubka úzce souvisí s rychlostí ochlazování. Dále vycezeniny začínají ve výšce přibližně od 1/3 odlitku až do nálitku. Stvolové vycezeniny představují nejen lokální chemickou nehomogenitu, ale jsou to zároveň místa s výrazným poklesem mechanických a plastických vlastností [5], [9].

Existují 3 možné hypotézy vzniku stvolových vycezenin:

1. Skupina plynových hypotéz
2. Skupina rozdílné hustoty obohacené taveniny a zbývající tekuté fáze
3. Skupina působení gravitace a objemového smrštění

5.3.2 Identifikace vady

Stvolové vycezeniny mají nejčastěji podobu tmavých pásů, orientovaných rovnoběžně se svislou osou odlitku a mají výrazně zvýšený obsah prvků (S,P,C). Dále mohou mít podobu ředin, nebo bublinových kanálků. Vycezeniny jsou podpovrchovou vadou a bývají objeveny teprve během mechanického opracování odlitků. Jejich výskyt je častý u masivních odlitků válcovitého tvaru, jako jsou např. hutní válce, nosné kruhy cementářských pecí, čepy beranů a jiné [9].

5.3.3 Vliv metalurgických a technologických faktorů

Literatura [9] uvádí, že pro objasnění možnosti ovlivnit rozvoj vad stvolového charakteru byl proveden průzkum stupně závažnosti řady metalurgických a technologických faktorů, které mohou během výrobního cyklu odlitku uplatnit z tohoto hlediska. Konkrétně byl sledován vliv:

1. Způsob výroby oceli - sekundární metalurgie + EOP
2. Způsob dezoxidace
3. Způsoby vyzdění pánve - glazovaná nebo nově vyzděná
4. Teplota lití
5. Množství nauhličujících přísad dodaných do pánve po korekci obsahu uhlíku
6. Vakuování
7. Rychlost odlévání (velikosti výlevky pánve)
8. Intenzita odvodu tepla formou během tuhnutí odlitku (formovací směsi s rozdílným koeficientem tepelné difuze „br“, chladítka, izolace).

Výsledky autorů [9] říkají, že z prvních sedmi uvedených faktorů nemá žádný rozhodující vliv na rozsah výskytu stvolových vycezenin. Jediným zjištěným faktorem, který významně ovlivňuje výskyt vad stvolové povahy je odvod tepla formou. Použitím formovacích materiál s vyšším koeficientem tepelné difuze (bf), jako jsou například chrommagnezitové směsi, se podstatně zmenšil počet stvolových vad. Navíc se pásmo jejich výskytu stáhlo do větší vzdálenosti od povrchu odlitku, po následném opracování tyto vycezeniny nezasahují do povrchu odlitku a z hlediska funkce tedy nejsou na závadu [9].

5.3.4 Opatření proti vzniku stvolových vycezenin

Intenzivní odvod tepla je zvlášť důležitý u ocelí s vyšším obsahem C, které se vyznačují širokým intervalem tuhnutí, tím i značné šířky dvoufázového pásma a relativně dlouhé doby tuhnutí. Kromě tepla nad teplotou likvidu a krystalizačního tepla je nutné odvést také teplo intervalu tuhnutí.

U ocelových odlitků s vysokým obsahem C nemusí být teplo odvedené formovací směsí dostatečné a je nutné použít intenzifikovat odvod tepla soustavami masivních tvarových chladítek [9].

Nejjednodušší z metalurgických opatření k potlačení stvolových vycezenin je snižování obsahu segregujících prvků a plynů. Snižování obsahu prvků P, S v tavenině vede současně ke snížení obsahu těchto prvků ve vlastním segregátu a výsledná segregace je pak méně výrazná.

Při výrobě ocelí určených pro masivní odlitky se ve VHM a.s. stalo pravidlem, snižovat obsahy prvků P, S na co nejnížší hodnoty. Při použití vakuového zpracování oceli pak vodík nepřesahuje koncentraci $2,5 \text{ cm}^3/100\text{g}$ [10].

Prvek	Fosfor (P)	Síra (S)
Max. obsah [%]	0,02	0,015
Běžný obsah [%]	0,008-0,015	0,006-0,012

Tab. 7 Obsahy P a S v ocelích určených pro masivní odlitky ve VHM a.s. [10].

V současné době se pomocí vakuového zpracování dosahuje obsahů prvků P, S až 10x nižších než je maximální povolený obsah viz. tab 7.

5.4 Praskliny po upálení nálitku

Častou vadou masivních odlitků jsou praskliny, vzniklé po upálení nálitku kyslíko-acetylenovým hořákem, tedy nikoli v době upalování nálitku, jak se většinou předpokládá. Protože se teploty ve středu řezné plochy ve zbytku nálitku po jeho odstranění pohybují kolem 450 - 500 °C, lze mluvit o prasklině, protože se vše odehrává převážně v pružné oblasti materiálu [11].

Pouze v případě velkých nálitků, odstraňovaných z teploty chladnutí odlitku ve formě, což je však mimořádné, se teplota uvnitř nálitku pohybuje kolem cca 900 °C a porucha je charakteru trhliny. Tyto vady vyvolává tahové dočasné napětí, způsobené jednak rychlým ochlazením a smrštěním řezné plochy (především jejího středu, který je teplejší než okraje), jednak sáláním tepla do okolí a odvodem tepla vlastním odlitkem (zvláště když má nízkou teplotu). Dočasné napětí se sčítá s rostoucím trvalým napětím v nálitku (obě jsou tahová), takže výsledné napětí snadněji překoná pevnost materiálu a vznikne porucha souvislosti [11].

Méně náchylné ke vzniku prasklin jsou odlitky z nízko a středně uhlíkových ocelí, které mají vyhovující plastické vlastnosti, takže se nemusí pro operaci odstraňování nálitků (do cca 400 mm) ani předehřívat. Zvýšené nebezpečí je u vysokouhlíkových a středně legovaných ocelí a odlitky i s nálitky se musí předehřívat. Teplota se řídí podle druhu oceli a rozměru nálitku a nemá být nižší než 150 °C a vyšší než 400 °C [11].

5.5 Trhliny

Pouhým okem viditelné natržení, nebo roztržení odlitku, které je charakteristické svým křivolakým průběhem a zoxidovaným povrchem. Trhlina probíhá po hranicích primárně krystalizovaných zrn při vysokých teplotách v blízkosti solidu, kdy je rozhraní zrn méně pevné než vlastní zrno. Nižší pevnost rozhraní je způsobena segregací složek s nižším bodem tání. Trhlina prochází mezi zrny, proto je průběh trhliny křivolaký [5].

Otevřené trhliny vznikají nejčastěji v tzv. tepelných uzlech odlitku, kde je relativně pomalejší tuhnutí a v důsledku toho také momentálně nižší pevnost a tažnost materiálu. Podmínkou pro vznik trhliny v daném místě odlitku je tahové (nebo smykové) napětí, které překročí tažnost materiálu. Toto napětí působí kolmo na průběh trhliny, povrch trhliny je zoxidovaný [5].

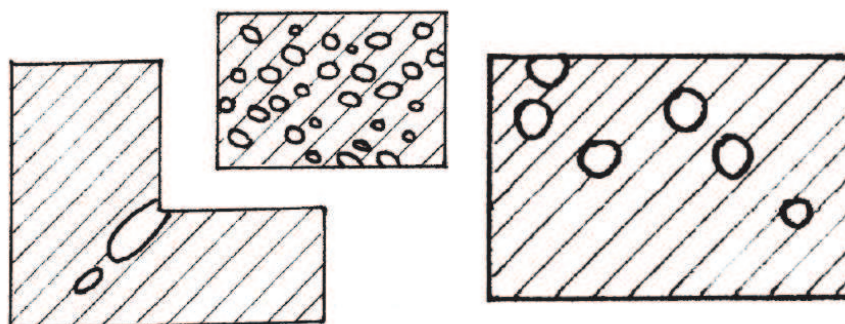
5.6 Bubliny

Bublinami se rozumí malé dutiny v odlitku a to buď otevřené, tj. spojené s povrchem, nebo uzavřené, tj. vnitřní.

5.6.1 Popis vady

Bubliny se vyskytují se jako jednotlivě, nebo v rozsáhlých shlucích. Vnitřní (uzavřené) bubliny mohou být s čistým lesklým povrchem, nebo s povrchem zoxidovaným. Otevřené bubliny mají povrch pokryt vrstvou oxidů, což je následkem styku s atmosférou během tuhnutí a chladnutí odlitku.

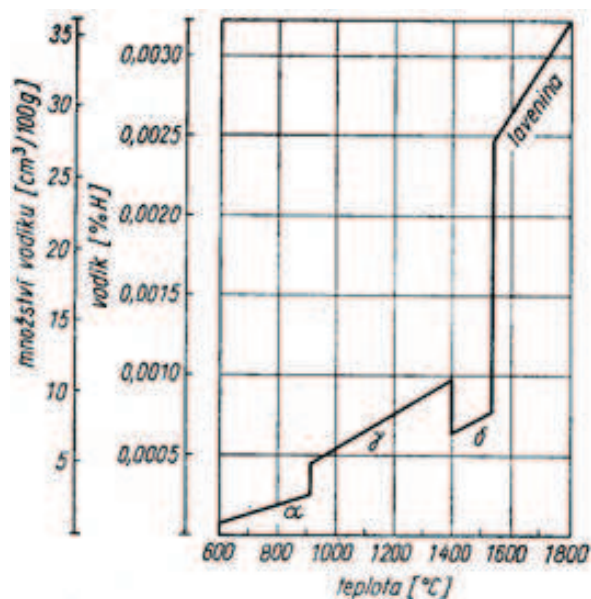
Podle původu se dělí bubliny na exogenní a endogenní. Endogenní bubliny vznikají z plynů rozpuštěných ve slitině, jestliže tlak rozpuštěných plynů převýší odpory působící proti nim. Exogenní bubliny vznikají při odlévání, jestliže tlak plynů v okolí formy převýší odpor, který mu klade tuhnoucí povrchová vrstva, pak plyny vniknou do odlitku. Na tvorbě bublin se výhradně podílí kyslík, dusík a vodík [5].



Obr. 8 Schéma vady [5].

5.6.2 Endogenní bubliny

Například vodíkové bubliny vznikají při chladnutí a tuhnutí slitiny kovu v odlitku následkem přesycení taveniny rozpuštěným vodíkem. Maximální rozpustnost vodíku v čistém roztaveném železe je při teplotě 1600°C a tlaku 101 325 Pa asi 27 cm³ /100 g viz. graf 2. Při překročení kritické hodnoty rozpustnosti se v tavenině železa začnou vytvářet vodíkové bubliny. Mechanismus vzniku dusíkových bublin je obdobný.



Graf 2 Rozpustnost vodíku v čistém železe při $p_{H_2}=101\,325\text{ Pa}$ [8].

Kyslíkové bubliny vznikají nejčastěji tak, že kyslík tvoří bubliny nepřímo, tj. tvoří s uhlíkem během chladnutí a tuhnutí oxid uhelnatý (CO_2). Ten je v tavenině prakticky nerozpustný a proto tvoří v odlitku bubliny [5].

5.6.3 Identifikace vady

Otevřené povrchové bubliny je možno zjistit vizuálně ještě před mechanickým opracováním. Uzavřené bubliny jsou zjistitelné zkouškou ultrazvukem, prozářením nebo se objeví také po mechanickém obrobení. K určení původu a mechanismu vzniku je někdy třeba odlišit od sebe jednotlivé typy dutin. Pro rozlišení bublin způsobených kyslíkem, vodíkem a dusíkem je nutné provést stanovení obsahu jednotlivých plynů, protože podle tvaru, velikosti, rozložení atd. od sebe nejsou rozpoznatelné [5].

6. Nosné kruhy cementářských pecí

Celková hmotnost tekutého kovu spotřebovaného na odlití největších nosných kruhů je na hranici možností ocelárny. Vývoj technologie se zaměřil na zvýšení využití tekutého kovu a na snížení výskytu vad.

Původní technologie používala pouze malé nekontaktní chladítka na stěnách odlitku. Výzkum se zaměřil na použití masivních kontaktních/nekontaktních chladítek ve spodní části odlitku. Obě nově navržené technologie je třeba srovnat podle dosažených výsledků.

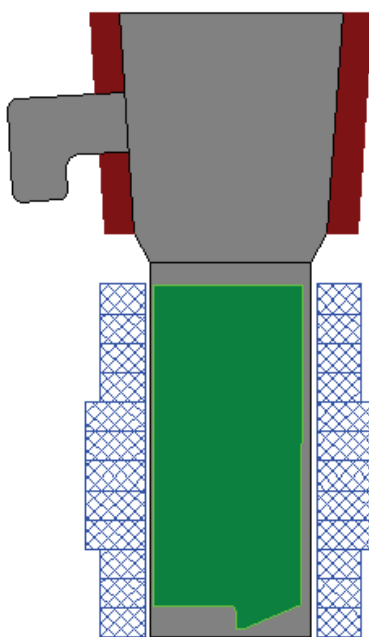
6.1 Nosný kruh č.1 – technologie bez spodního chlazení

Ve slévárně Vítkovice Heavy Machinery a.s. proběhlo 11.5.2010 odlití odlitku nosného kruhu č. odlitku 6527 (dále kruh č. 1). Jednalo se o odlitek s použitím staré technologie, tedy chlazený po obvodu nekontaktními chladítky a bez použití chladítek ze spodní části odlitku. Surová hmotnost odlitku byla 263 t.

6.1.1 Formování

V první fázi formování byla do kesonu umístěna vtoková soustava, která byla zavedena šikmo ze spodu do odlitku. Dále probíhalo postupně formování odlitku kruhu po jednotlivých segmentech.

Po obvodu byly zaformovány řady nekontaktních chladíčů tvaru kostky o rozměru 100x100x150-200) viz. obr. 9. Hmotnost nekontaktních chladíčů (kostek) byla přibližně 66 t.



Obr. 9 Schéma technologie bez
spodního chlazení

	Vnější průměr		Vnitřní průměr		Celkem
Menší kostky délka 150 mm	7 řad	20 t	7 řad	14 t	34 t
Větší kostky délka 200 mm	5 řad	19t	5 řad	13 t	32 t
Hmotnost		39 t		27 t	66 t

Tab. 8 Přibližné hmotnosti nekontaktních chladičů použitých u odlitku č. 1



Obr. 10 Formování kruhu č. 1

6.1.2 Lití kovu

Na nosný kruh č. 1 byl použit materiál G28Mn6.

Odlévání základní tavby (do třetiny nálitku) proběhlo během 2 min 40 s. Čas lití do krčku byl 2 minuty a 52 s. Odlévání probíhalo současně ze čtyř pánví (68t, 68t, 40t, 40t). Teplota kovu v jednotlivých pánvích základní tavby byla (68t) - 1552 °C, (68t) - 1540 °C, přesné teploty dalších taveb nebyly změřeny, ale dají se přibližně určit: pánev (40t) – počáteční teplota 1556, prodleva 35 min, přepočteno na 1539 °C, pánev (40t) – počáteční teplota 1570, prodleva 24 min, přepočteno na 1558 °C. Dolévání kovu do nálitku proběhlo po 2,5 hod. kovem o teplotě 1588-1591 °C. Hmotnost kovu na dolití byla 47t. Celkem bylo spotřebováno 263 t oceli.

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cu
Norma DIN EN 10293	0,25 0,32	1,2 1,8	max. 0,6	max. 0,02	max. 0,02	max. 0,3
Předpis VS	0,26 0,31	1,4 1,8	0,35 0,55	max. 0,018	max. 0,012	max. 0,2
Základní tavba1	0,261	1,49	0,51	0,009	0,005	0,11
Základní tavba 2	0,273	1,44	0,47	0,01	0,003	0,12
Základní tavba 3	0,27	1,49	0,45	0,01	0,002	0,11
Základní tavba 4	0,283	1,47	0,49	0,009	0,011	0,1
Kov na doliti	0,212	0,72	0,38	0,006	0,008	0,1
Prvek	Ni	Cr	Mo	Ti	Al	N
Norma DIN EN 10293	max. 0,4	max. 0,3	max. 0,1	max. 0,15		
Předpis VS	max. 0,4	max. 0,3	max. 0,1	max. 0,015 0,015	0,015 0,035	-
Základní tavba1	0,174	0,145	0,047	0,014	0,031	0,006
Základní tavba 2	0,182	0,1	0,042	0,011	0,024	0,0057
Základní tavba 3	0,162	0,108	0,046	0,015	0,02	0,0048
Základní tavba 4	0,154	0,117	0,042	0,013	0,025	0,0077
Kov na doliti	0,124	0,13	0,037	0,005	0,028	0,0067

Tab. 9 Chemické složení kovu nosného kruhu č. 1 ve hmot.% (G28Mn6)

6.1.3 Zjištěné vady

Na vnitřním průměru bylo pomocí magnetické zkoušky zjištěno přibližně 150 indikací. Jednalo se především o praskliny a vycezeniny. Vady byly opravitelné, byly vybroušeny a následně zavařeny.

Na podnálitkové ploše bylo objeveno cca 60 indikací zjištěných magnetickou zkouškou. Z 80% se jednalo o vycezeniny, dále pak nejčastěji o praskliny a řediny. Vady byly opraveny.

6.2 Nosný kruh č.2 – technologie s použitím kontaktních chladítek

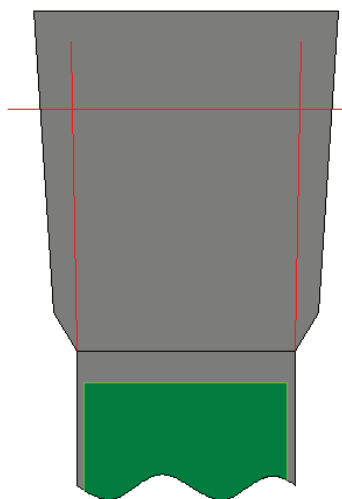
Před začátkem výroby kruhu č. odl. 6674 proběhla simulace tuhnutí a deformací. Výsledkem simulace bylo navržení technologie s vyšším využitím tekutého kovu a usměrnění tuhnutí. Vyšší usměrnění tuhnutí mělo snížit výskyt vad a zlepšit vnitřní homogenitu odlitků. Tohoto pokroku mělo být dosaženo použitím masivního kontaktního chladiče ve spodní části formy [12].

Technologie je sledována zejména v následujících fázích výroby nosného kruhu:

- U formování bylo důležité správné uložení kontaktních chladítek a nové, šikmé vyústění vtokové soustavy.
- Měření teplotního pole formy bylo provedeno za účelem porovnání a ověření přesnosti dat získaných simulací.

Odlití odlitku č. 6674 proběhlo 8. 2. 2011. Surová hmotnost odlitku se vlivem úspory kovu zmenšeným nálitkem snížila na 233 t.

6.2.1 Úpravy provedené zavedením nové technologie



Obr. 11 Zmenšení nálitku zavedením nové technologie [13].

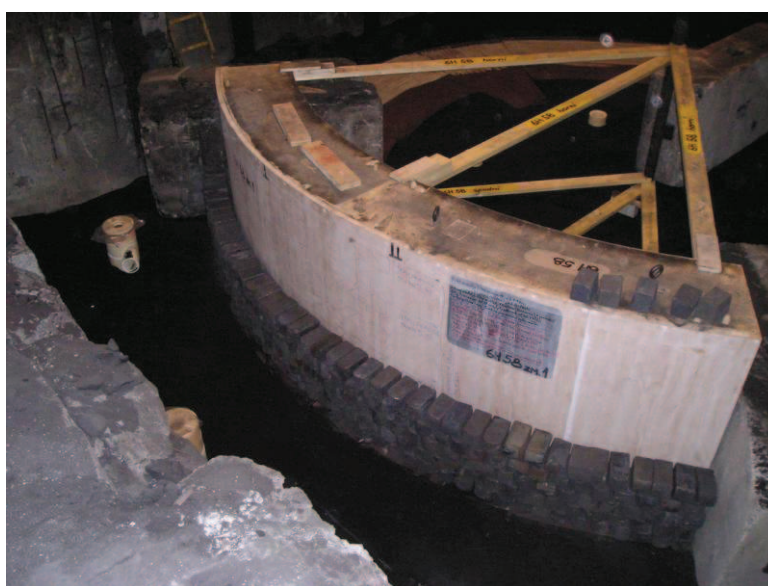
- Úspora na výšce odlitku
Výška nálitku – 650 mm (původně přibližně 900 mm)
- Úspora na tloušťce nálitku
Zarovnáno rozšíření v oblasti krčku
Výška krčku původní – 90 mm
- Celková úspora tekutého kovu je díky zmenšení nálitku cca **30 tun**
- Menší náletek vede ke kratšímu celkovému času tuhnutí [13].

6.2.2 Formování

V první fázi formování byla do kesonu umístěna vtoková soustava a sada masivních chladičů. Vtoková soustava byla zavedena šikmo do středu kruhu – jádra prostřednictvím vtoků pod chladiče. Chladiče byly v kesonu umístěny tak, aby tvořily plochu pro umístění modelu kruhu a současně aby mezera mezi chladiči byla pouze minimální. K dosažení požadovaného průměru byly mezi části chladička vloženy tři klíny viz. obr. 12. Boční stěny byly chlazeny řadami nekontaktních chladičů tvaru kostky o rozměru 100x100x100-150-200). Dále probíhalo postupně formování odlitku kruhu po jednotlivých segmentech.



Obr. 12 Kontaktní chladičko

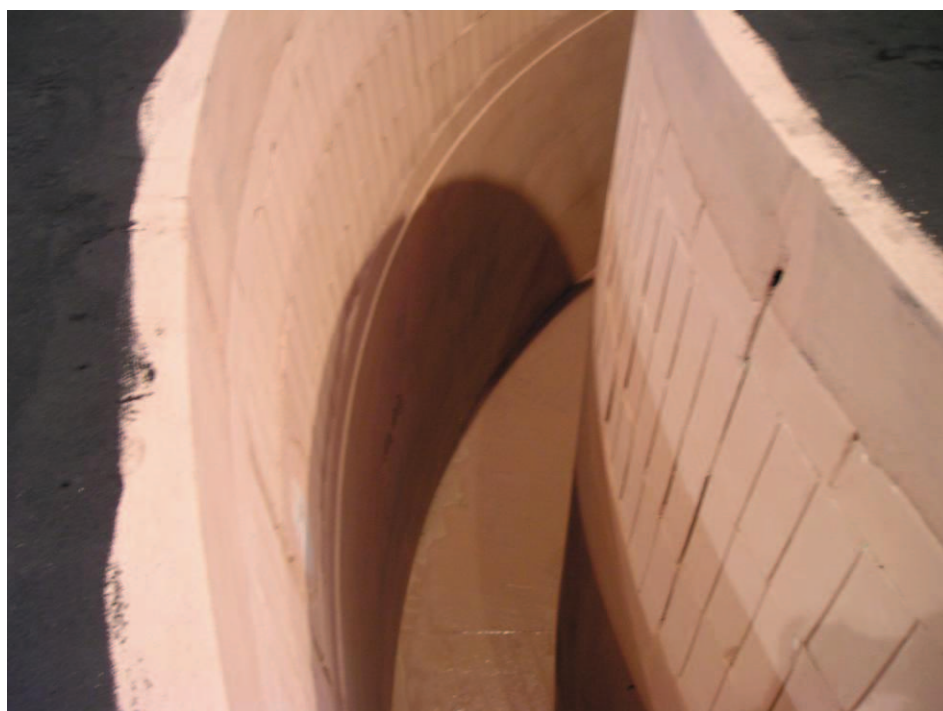


Obr. 13 Model pro formování po segmentech

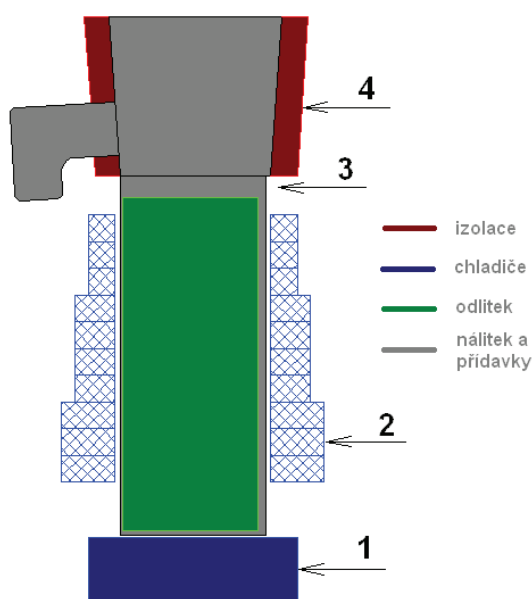


Obr. 14 Zaformovaná vnější část modelu segmentu

Nejdříve byly kolem modelu vyskládány nekontaktní chladítka a zasypány formovací směsí viz *obr. 12,13*. U formování nálitku byly použity izolační tvárnice. Nakonec byla forma opatřena nátěrem na vodní bázi viz *obr. 15*.



Obr. 15 Hotová forma opatřená nátěrem



Obr. 16 Umístění termočlánků
na řezu stěnou odlitku

V průběhu formování jednoho ze segmentů byly do formy postupně umístěny 4 termočlánky typu K. První byl umístěn na vnější straně spodního chladítka přibližně v polovině jeho výšky. Druhý byl umístěn za jeden z chladíčů (kostek ve čtvrté řadě nad spodním chladítkem), tj. asi 400mm nad tímto chladítkem. Třetí termočlánek byl umístěn v krčku odlitku a poslední za tepelnou izolaci náličky viz obr. 16 [12].

6.2.3 Chlazení odlitku č. 2

Kontaktní chladíč byl složen z 12 segmentů. Z toho 9 segmentů klasických, každý o hmotnosti 5t a 3 klíny, každý o hmotnosti 3,5t. Celková hmotnost kontaktního chladíče byla tedy 55,5t. Dále byly vyskládány 3 řady nekontaktních chladících kostek o rozměrech 100x100x200, 4 řady kostek o rozměrech 100x100x150 a 3 řady o rozměrech 100x100x100 o celkové hmotnosti 57,5t viz. tab. 10

	Vnější průměr		Vnitřní průměr		Celkem
Malé kostky délka 100 mm	3 řady	5,5 t	3 řady	4 t	9,5 t
Střední kostky délka 150 mm	4 řady	11 t	4 řady	7 t	18 t
Velké kostky délka 200 mm	3 řady	11 t	3 řady	7 t	18 t
Hmotnost		27,5 t		18 t	45,5 t

Tab. 10 Přehled hmotností nekontaktních chladíčů

6.2.4 Lití kovu

Na nosný kruh č. 1 byl použit materiál G24Mn5.

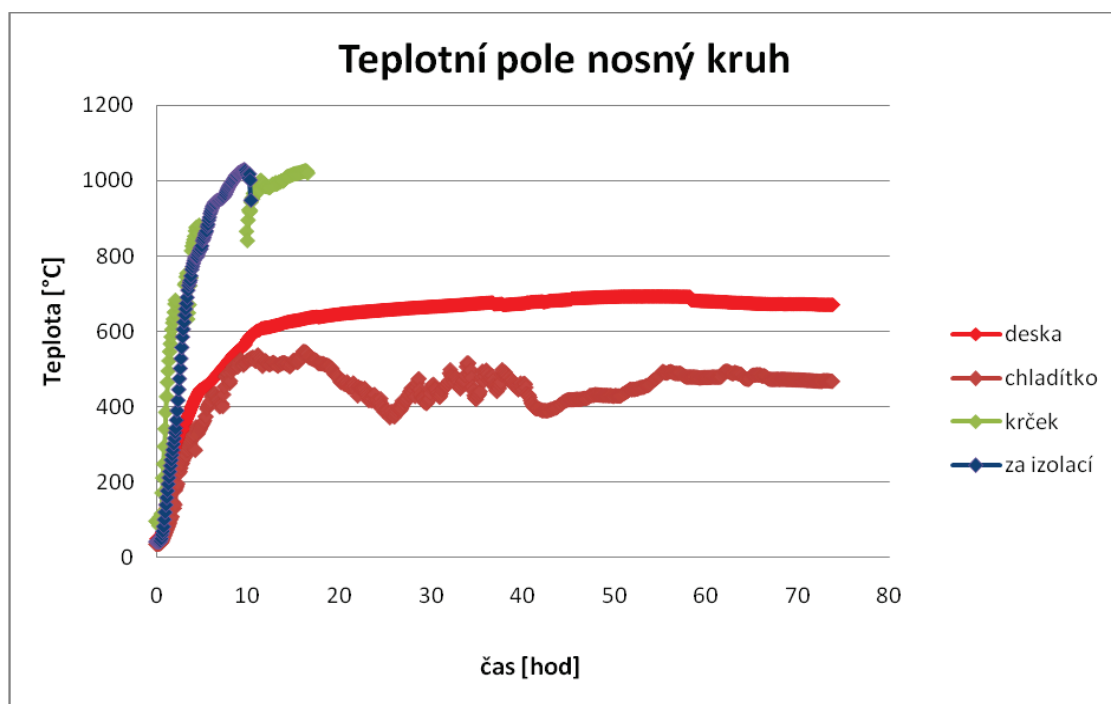
Odlévání základní tavby (do třetiny nálitku) proběhlo během 5 min. Začátek lití byl v 13:00 konec lití v 13:05. Čas lití do krčku byl 2 minuty a 52 s. Odlévání probíhalo současně ze tří pánví (68t, 68t a 40t). Teplota kovu v jednotlivých pánvích základní tavby byla 1531 °C, 1539 °C a 1553 °C. Dolévání kovu do nálitku proběhlo za 1,5 hod. kovem o teplotě 1588-1591 °C. Čas dolévání byl 11 minut (začátek dolévání byl v 14:35 hod., konec dolévání 14:46 hod.). Hmotnost kovu na dolití byla 57t Celkem bylo spotřebováno 233 t oceli.

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cu
Norma DIN EN 10293	0,23	1,3	max.	max.	max.	max.
	0,26	1,5	0,5	0,02	0,02	0,3
Předpis VS	0,23	1,35	0,3	max.	max.	max.
	0,26	1,5	0,5	0,012	0,01	0,3
Základní tavba1	0,25	1,39	0,45	0,006	0,002	0,13
Základní tavba 2	0,25	1,38	0,45	0,008	0,001	0,12
Základní tavba 3	0,23	1,37	0,45	0,008	0,002	0,12
Kov na dolití	0,23	0,83	0,41	0,006	0,001	0,14
Prvek	Ni	Cr	Mo	V	Al	N
Norma DIN EN 10293	max.	max.	max.	max.		
	0,4	0,3	0,1	0,1		
Předpis VS	0,2	max.	0,04	max.	0,015	
	0,4	0,3	0,1	0,015	0,035	-
Základní tavba1	0,23	0,13	0,05	0	0,034	0,0058
Základní tavba 2	0,22	0,14	0,06	0	0,035	0,0057
Základní tavba 3	0,22	0,12	0,06	0	0,035	0,0061
Kov na dolití	0,21	0,14	0,06	0	0,025	0,0036

Tab. 11 Chemické složení kovu ve hmot.% nosného kruhu č. 1 (G24Mn5)

6.2.5 Měření teplotního pole

Na odlitku nosného kruhu bylo v provozních podmínkách provedeno měření teplotního pole. Cílem bylo porovnat naměřené teplotní pole ve formě s výsledky získanými na základě numerických simulací v programu ProCAST. Společně s výpočtem chladnutí a tuhnutí byly prováděny také výpočty napěťového stavu v odlitku během tuhnutí a chladnutí, predikce vzniku trhlin a prasklin a také výpočet deformací odlitku během chladnutí [12].



Graf 3 Výsledky měření teplotního pole odlitku č. 1 [12].

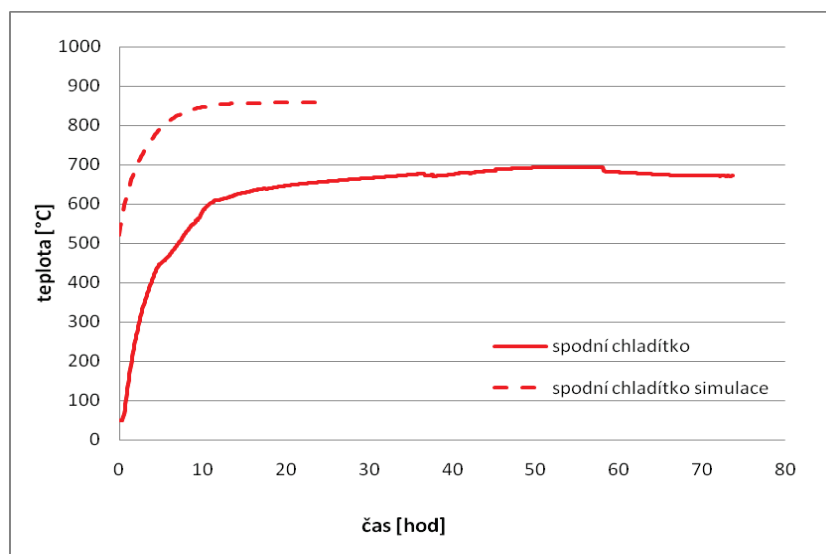
Z grafu vyplývá, že cca po 8 hodinách došlo v termočlátku měřící teplotní pole formy v oblasti krčku nálitku k překročení teploty 1000 °C a k porušení termočlátku. Teplota za tepelnou izolací rostla velice podobně jako v místě krčku nálitku. Po dvou hodinách po odlití základní tavby činila teplota za izolací 315°C, po 4 hod. 772°C, po 6 hod již 920°C a také došlo k porušení termočlátku. To ukazuje na rychlý nástup teploty za izolací nálitku.

Zajímavá křivka teploty byla naměřena na spodním chladíči. V čase 6 hod. je teplota chladítka v měřeném místě cca 400 °C. V tomto čase je ve spodní části podle výsledků numerické simulace vrstva ztuhlého kovu cca 220 mm. S rostoucím časem nastává další růst teploty chladítka. Další zlom na křivce nastává při teplotě spodního chladítka v měřeném místě při 600 °C. Této teploty je v daném místě chladítka dosaženo v čase cca 11 hod., kdy podle výsledků simulací je ukončeno tuhnutí odlitku (stále tekutý pouze náletek). Naměřená teplotní křivka za chladítkem – kostkou vykazuje značné kolísání [12].

6.2.6 Porovnání naměřených teplot s výsledky simulací

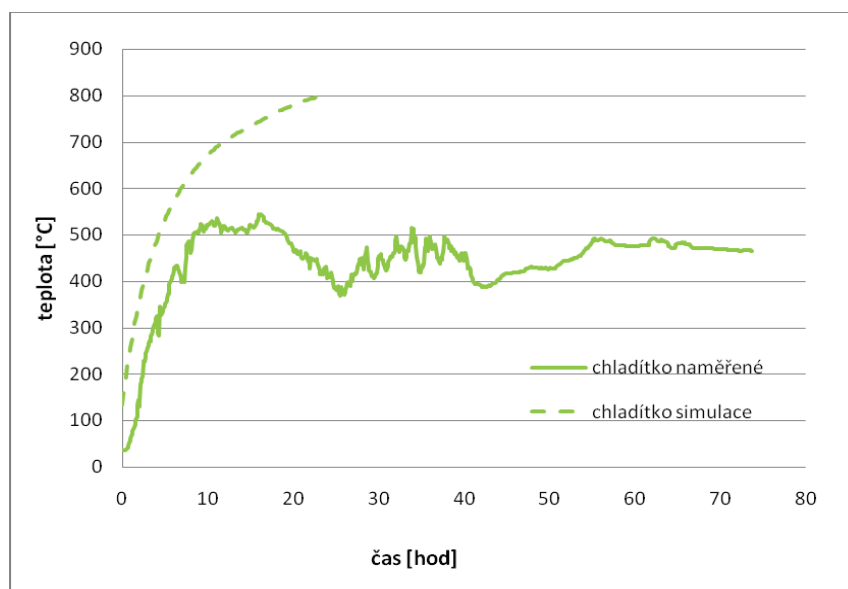
Pro posouzení přesnosti predikce teplotního pole odlitku kruhu a výskytu vad bylo provedeno porovnání reálného teplotního pole ve formě s výsledky simulací v programu ProCast. Při tomto porovnání je však nutné uvažovat to, že simulovaný odlitek kruhu nebyl velikostně totožný s odlévaným kusem a také umístění odlitku na spodním kontaktním chladiči bylo odlišné [12].

Výsledky porovnání teplot simulované a naměřené teploty na spodním chladítku jsou uvedeny v *grafu 4*. V případě simulovaného kusu byl odlitek umístěn ve středu spodního chladítka. Naproti tomu skutečný odlitek byl umístěn na spodním chladiči blíže ke středu – ose chladiče. Také plocha styku odlitku s chladítkem je nižší a tedy i množství tepla akumulovaného chladítkem musí být nižší. Teploty naměřené na vnějším průměru chladičů tak mohou být významně odlišné – nižší než u simulovaného stavu. To je zcela v souladu s naměřeným stavem, tzn. naměřená teplota na spodním chladítku je významně nižší než simulovaná [12].



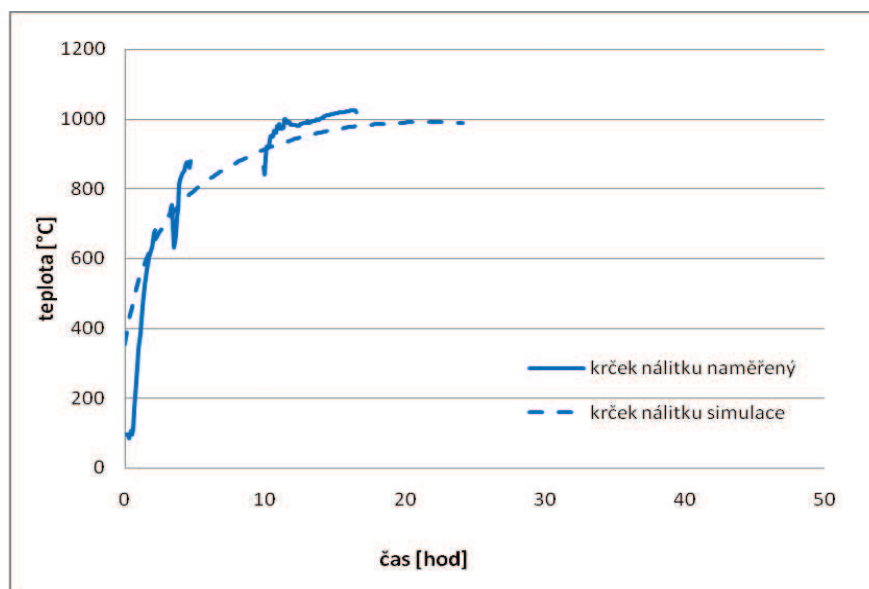
Graf 4. Porovnání simulované a naměřené teploty na spodním chladítku u odlitku kruhu [12].

Výsledky porovnání teplot simulované a naměřené teploty na bočním nekontaktním chladítku jsou uvedeny v *grafu 5*. V případě simulovaného náběh teploty chladítka (sklon křivky) podobný skutečnému – naměřenému stavu. U reálného kusu však teplota nedosahovala tak vysokých teplot a po dosažení teploty přes 500 °C docházelo ke kolísání naměřené teploty. To může souviset se změnou – dilatací formy a chladítka a změně kontaktu chladítka a termočlánku v měřeném místě [12].



Graf 5. Porovnání simulované a naměřené teploty na chladítku u odlitku kruhu [12].

Výsledky porovnání teplot simulované a naměřené teploty v krčku nálitku jsou uvedeny v grafu 6. V místě krčku nálitku je zřejmá velice dobrá shoda mezi simulovaným a naměřeným průběhem teploty [12].



Graf 6. Porovnání simulované a naměřené teploty v krčku nálitku u odlitku kruhu [12].

6.2.7 Shrnutí výsledků

V průběhu měření došlo v případě termočlánků v krčku nálitku k překročení teploty 1000°C. To vyvolalo i porušení těchto termočlánků. Výsledky měření teplotního pole jsou přesto velice důležité pro porovnání mezi naměřeným a simulovaným stavem. V případě teploty v krčku odlitku byly naměřené a simulované výsledky v dobré shodě. U dalších křivek byly zjištěny významné změny dané podmínkami simulací (jiný odlitek atd.), ale také související s podmínkami měření a změnou podmínek v průběhu chladnutí a tuhnutí [12].

6.2.8 Zjištěné vady

U odlitku č. 2 se v hloubce cca 200 mm pod podnátkovou plochou objevily ultrazvukové indikace v zóně dlouhé přibližně 2 m.

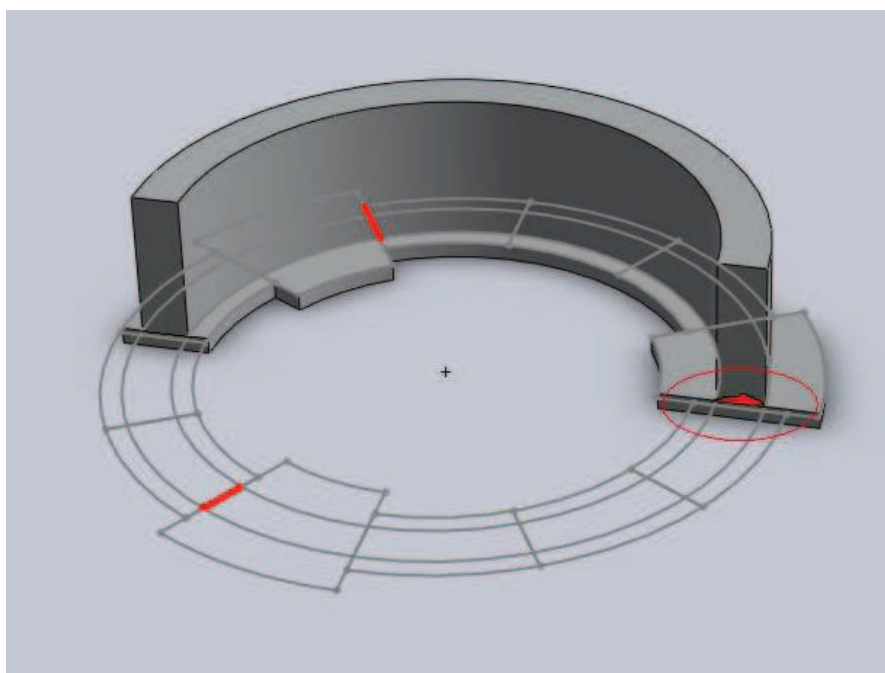
Pravděpodobná příčina vzniku vady souvisí s nedodržením lící teploty, dvě pánve o hmotnosti kovu 68 t měly v době lití asi o 20 °C nižší teplotu, než je teplota předepsaná. Tento chladnější kov vytvořil během lití ztuhlou vrstvu (kůru) na stoupající hladině, v této kůře zůstaly nečistoty z hladiny. Následně byla ztuhlá přelita tekutým kovem, ale nedošlo ke zpětnému roztavení, nečistoty nemohly vystoupat do nálitku a jsou tak příčinou ultrazvukových indikací.

Tyto drobné ultrazvukové indikace byly označeny jako přípustné vady.

Na vnitřním průměru bylo magnetickou zkouškou indikováno 39 drobných vad, jednalo se výhradně o praskliny. Průměrná délka prasklin byla 20-30 mm, průměrná hloubka byla 5 mm, maximální hloubka 12 mm. Tyto vady mohou být také zapříčiněny nízkou teplotou lití.

6.2.9 Masivní trhliny

Na povrchu odlitku se ve spodní části, tedy (v místě styku odlitku a kontaktního chladítka) objevily tři masivní vady probíhající celou tloušťkou stěny odlitku. Podle křivolakého průběhu a zoxidovaného povrchu byly tyto vady označeny jako trhliny.



Obr. 17 Rozložení trhlín po obvodu odlitku

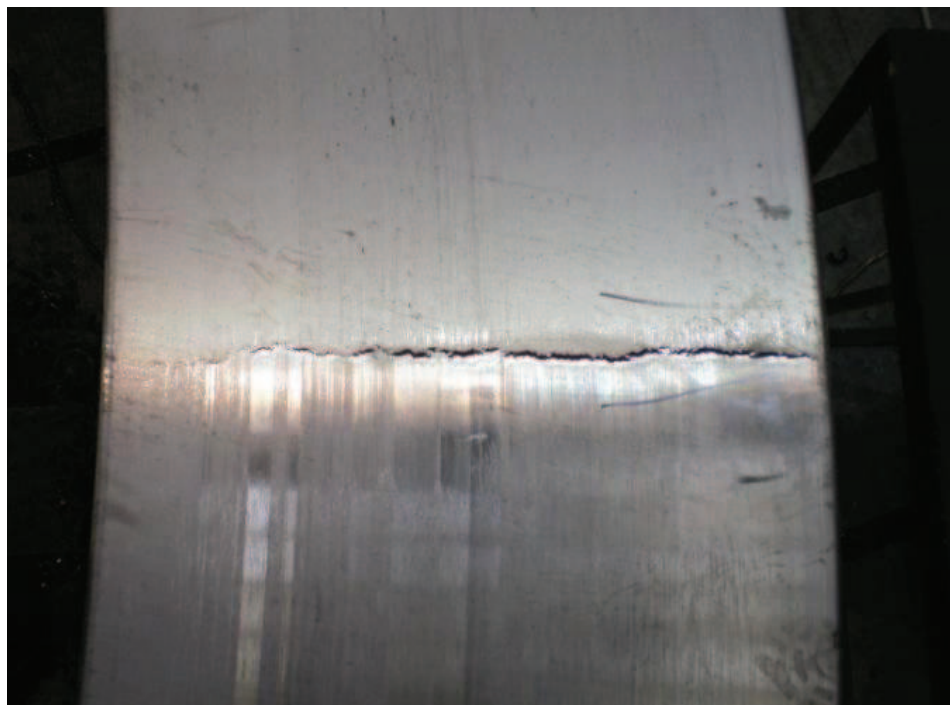


Obr. 18 Zjištěná trhlina



Obr. 19 Detail trhliny

Na obr. 19 je vidět typicky křivolaký průběh trhliny a zoxidovaný povrch trhliny. Pomocí ultrazvukové zkoušky byla určena maximální hloubka trhlín cca 5 cm.



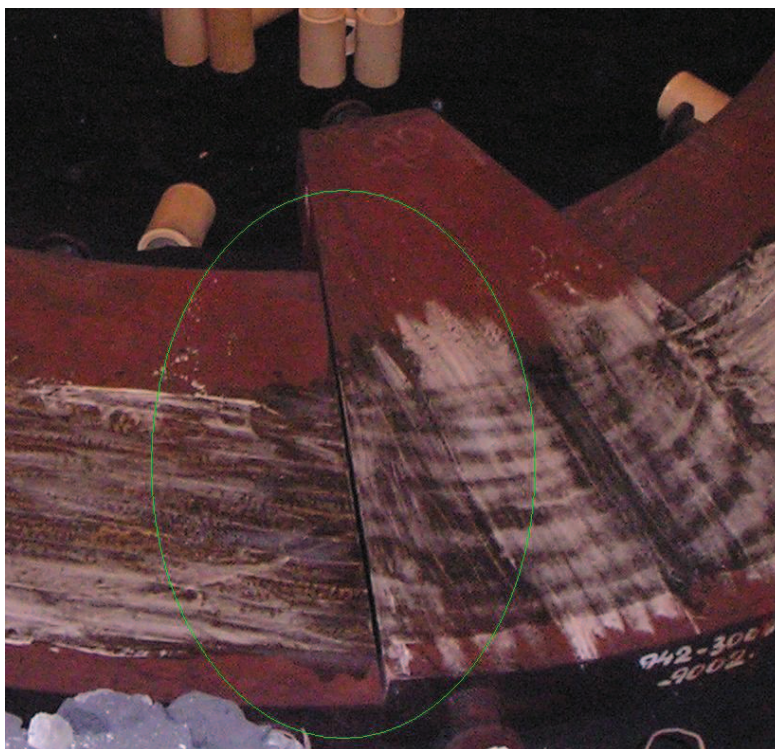
Obr. 20 Nejhlubší trhlina po obrobení přídavku

Jedna z trhlín zasahovala do odlitku víc, než byl přídavek na opracování. Proto byla nutná oprava trhliny vybroušením do hloubky cca 15 mm a následným zavařením.

6.2.10 První možná příčina vzniku trhliny

Uspořádání trhlín po obvodu odlitku odpovídá místům, kde byly během pokládání kontaktních chladítek vytvořeny mezery viz. *obr. 21*. Některé z mezer byly široké až 2 cm.

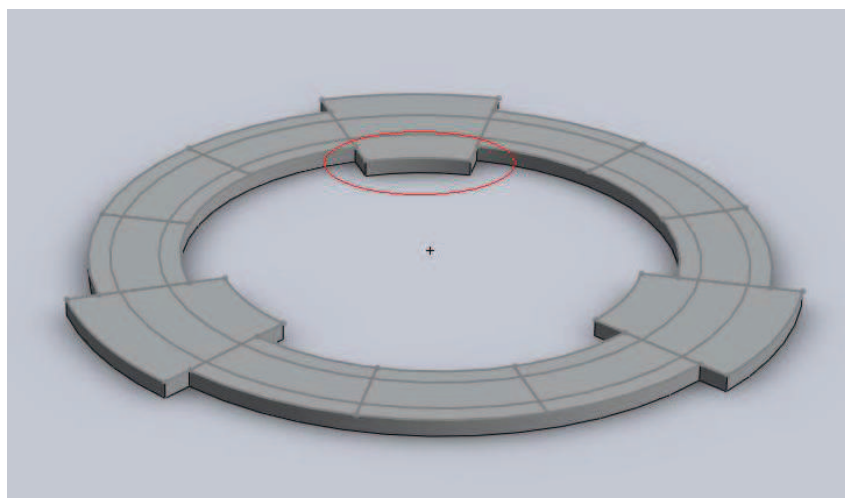
Tři z těchto mezer mohly dosáhnout kritické šířky. V těchto místech docházelo k velkému rozdílu teplot kovu a vzniku tepelného uzlu, během přechodu z tekuté do tuhé fáze došlo vlivem smrštění kovu ke vzniku tahového napětí, které následně překročilo mez pevnosti teplejšího kovu nad mezerou.



Obr. 21 Mezera mezi jednotlivými díly kontaktního chladítka

6.2.11 Druhá možná příčina vzniku trhliny

Až překvapivě pravidelné uspořádání trhlin (po 120°) nabízí další možnou příčinu vzniku. Mezi částí chladítka byly vloženy tři klíny. Rozdílná hmotnost a plocha styku mezi klíny a formovací směsí viz. obr. 22 mohly způsobit, že se v oblasti nad klíny dosáhlo vyššího ochlazovacího účinku. Rozdílná rychlost ochlazování pak vedla ke vzniku tepelného uzlu a následnému vzniku trhliny.



Obr. 22 Rozdílná plocha styku klín/formovací směs

6.2.12 Navržená opatření**6.2.12a. Pásovina (plech)**

Tato varianta spočívá ve vsunutí (zaražení) pásovinu do vzniklé mezery mezi klínem a dílem chladítka. Tepelná roztažnost chladítka při nalití kovu by zajistila silový styk a velkou stykovou plochu mezi klínem, pásovinou a dílem chladítka. Tímto způsobem by byl zajištěn dobrý přestup tepla a omezení rizika vzniku trhliny.

Nevýhodou této metody je nutnost obstarat velkou škálu šířek pásovinu, problematického zaražení pásovinu do mezery. Varianta je vhodná pro odstranění trhlin vzniklých první příčinou viz. odstavec 6.2.10

6.2.12b. Kovové broky + vodní sklo

Aby se odstranily problémy se zasunutím pásovinu, nabízí se řešení smíchat kovové broky s vodním sklem a vzniklou směs upěchovat do mezery. Výhodou této metody je jednoduchost a rychlost. Nevýhodou je nejasný přestup tepla mezi klínem, vodním sklem s broky a částí chladítka. Varianta je také vhodná pouze pro odstranění trhlin vzniklých první příčinou viz. odstavec 6.2.10

6.2.12c. Speciální rozměry klínů

Tato metoda vyžaduje pořízení sady klínů, které by byly odstupňovány podle požadovaného průměru chladítka. Tato varianta by zajistila stejnoměrný přestup tepla mezi obvodem chladítka a okolní formovací směsí. Nevýhody této metody jsou velmi vysoké pořizovací náklady, náročnost na skladování atd. Metoda vhodná pro odstranění vzniku trhlin vzniklých metodou č. 2 viz. odstavec 6.2.11

6.3 Nosný kruh č.3 - technologie s použitím nekontaktních chladítek

Ve slévárně Vítkovice Heavy Machinery a.s. proběhlo 2.3.2011 odlití odlitku nosného kruhu č. odlitku 6675 (dále kruh č. 2). Jednalo se o odlitek s využitím nekontaktních chladítek (tzv. puků) ke snížení výskytu slévárenských vad a mírnému zvýšení odvodu tepla ve spodní části odlitku. Technologie byla alternativou k použití kontaktních chladítek. Odlitek byl opět chlazen ze spodu, ale chladicí účinek nekontaktní chladítek se dostavil výrazně později a s nižším účinkem. Surová hmotnost odlitku byla 233 t.

6.3.1 Formování

V první fázi formování byla do kesonu umístěna vtoková soustava, vyústěná do odlitku ze spodu a sada chladičů tvaru válce (puků) o průměru i délce 650mm, které byly následně zasypány cca 50 mm silnou vrstvou chromitové směsi. Celková hmotnost puků byla přibližně 40 t. Boky odlitku byly opět chlazeny nekontaktními chladiči (kostkami), hmotnosti těchto chladičů viz *tab. 12*

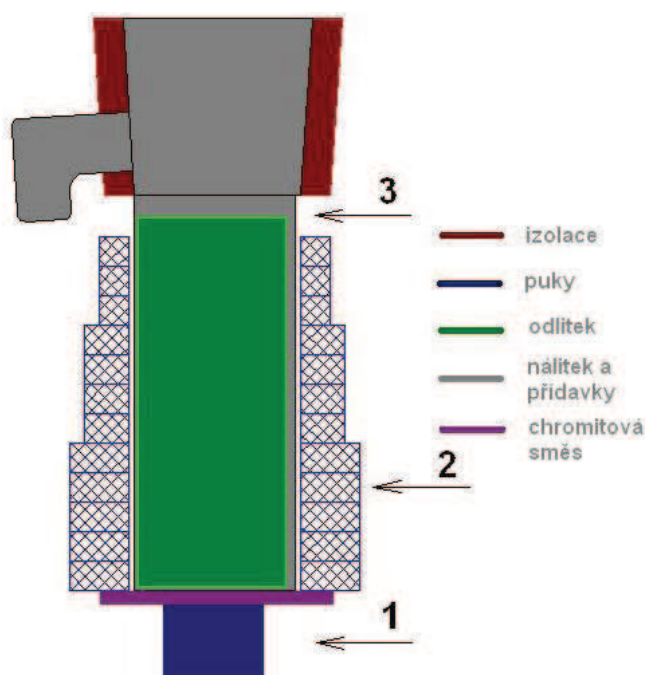
Dále probíhalo postupně formování odlitku kruhu po jednotlivých segmentech obdobně jako u nosného kruhu č. 2.



Obr. 23 Puky a vyústění vtokové soustavy použité u formování kruhu č. 3

	Vnější	průměr	Vnitřní	průměr	Celkem
Malé kostky délka 100 mm	3 řady	5,5 t	3 řady	4 t	9,5 t
Střední kostky délka 150 mm	4 řady	11 t	4 řady	7 t	18 t
Velké kostky délka 200 mm	5 řad	18 t	5 řad	12 t	30 t
Hmotnost		34,5 t		23 t	57,5 t

Tab. 12 Hmotnosti nekontaktních chladičů použitých u odlitku č. 3

Obr. 24 Rozložení termočlánků
na nosném kruhu č. 3

V průběhu formování jednoho ze segmentů byly do formy postupně umístěny 3 termočlánky. První termočlánek byl umístěn 100 mm pod podstavou kruhu, mezi nekontaktní chladiče. Druhý byl umístěn za jednu z chladičích kostek a poslední měřil teplotu v krčku viz. obr. 24

6.3.2 Lití kovu

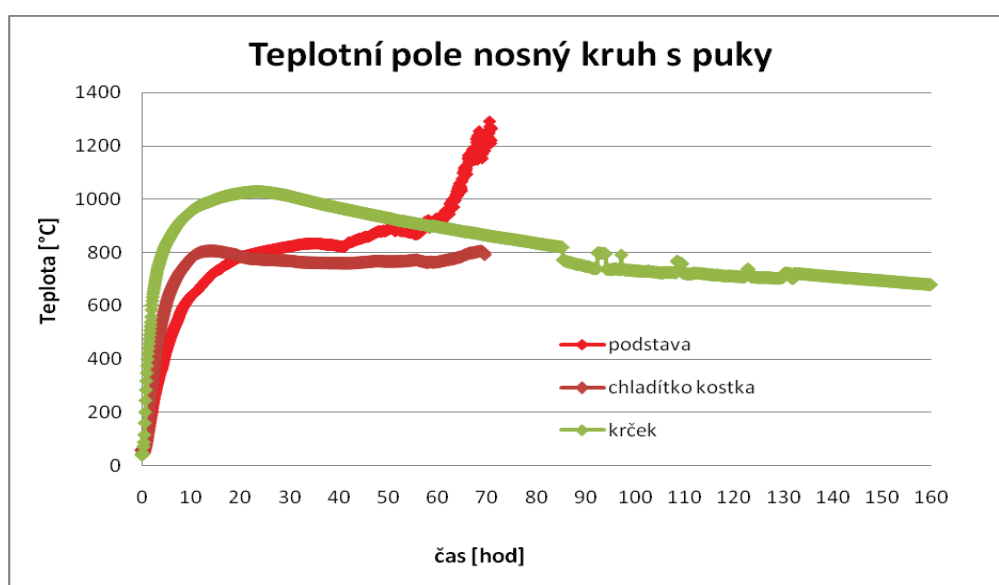
Na nosný kruh č. 3 byl použit materiál stejný materiál jako na kruh č. 2, tedy G24Mn5. Odlévání základní tavby (176 t) přibližně do třetiny nálitku proběhlo během 7 min 40 s. Odlévání probíhalo současně ze tří pánví 68t, 68t a 40t. Teplota kovu v jednotlivých pánvích základní tavby byla 1553 °C, 1555 °C a 1560 °C. Dolévání kovu do nálitku bylo předepsáno po 2,5 hod (skutečnost 152 min), kovem o teplotě 1597 °C. Čas dolévání byl 3 min 20 s. Hmotnost kovu na doliť byla 57 t.

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cu
Norma DIN EN 10293	0,23	1,3	max.	max.	max.	max.
	0,26	1,5	0,5	0,02	0,02	0,3
Předpis VS	0,22	1,35	0,3	max.	max.	max.
	0,26	1,5	0,5	0,012	0,01	0,2
Základní tavba1	0,25	1,43	0,44	0,008	0,001	0,16
Základní tavba 2	0,24	1,43	0,42	0,008	0,001	0,17
Základní tavba 3	0,24	1,44	0,45	0,009	0,002	0,15
Kov na doliti	0,22	0,82	0,42	0,007	0,008	0,14
Prvek	Ni	Cr	Mo	V	Al	N
Norma DIN EN 10293	max.	max.	max.	max.		
	0,4	0,3	0,1	0,1		
Předpis VS	0,2	max.	0,04	max.	0,015	-
	0,4	0,3	0,1	0,015	0,035	
Základní tavba1	0,22	0,21	0,06	0,004	0,027	0,0034
Základní tavba 2	0,25	0,19	0,05	0,004	0,02	0,0054
Základní tavba 3	0,22	0,19	0,06	0,004	0,037	0,0061
Kov na doliti	0,16	0,17	0,05	0,003	0,033	0,0058

Tab. 13 Chemické složení kovu ve hmot.% nosného kruhu č. 3

6.3.3 Měření teplotního pole

Na odlitku nosného kruhu s puky bylo stejně jako u kruhu č. 2 provedeno měření teplotního pole.



Graf 7 Výsledky měření teplotního pole odlitku č. 3

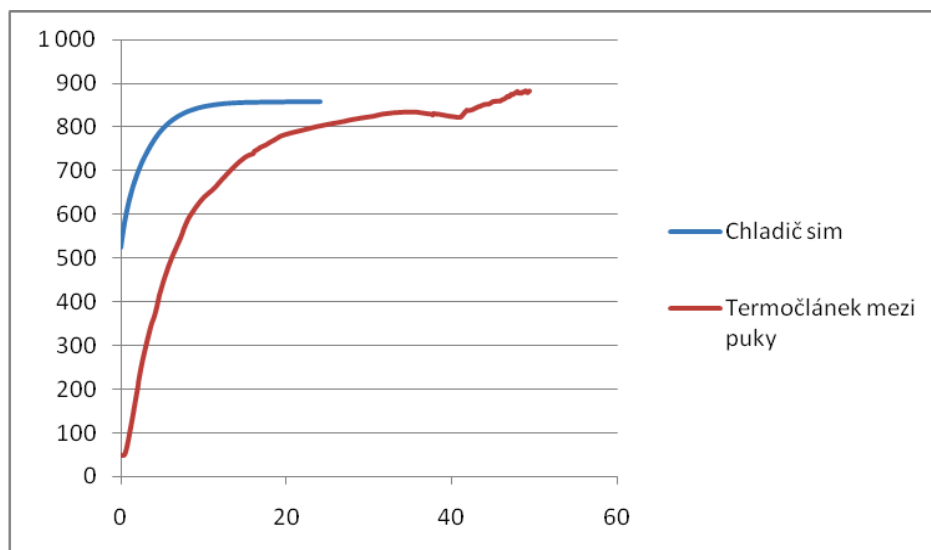
Teplota v krčku vykazovala strmý růst. Po dvou hodinách po odlití základní tavby činila teplota za izolací 600 °C, po 4 hod. cca 800 °C. Dále se nárůst teploty prudce zbrzdil. K překročení teploty 1000 °C v krčku nálitku došlo až po cca 11 hodinách. Teplota za nekontaktními chladiči (kostkami) měla podobný průběh, jako v místě krčku nálitku, nárůst byl pozvolnější a maximální teploty 800 °C bylo dosaženo po cca 10 hodinách.

Zajímavá křivka teploty byla naměřena na spodním chladiči. V čase 6 hod. je teplota mezi chladičky cca 470 °C. V čase 10 hod. překročí teplota u podstavy 600 °C. Podle simulace by v čase cca 13 hod. mělo být ukončeno tuhnutí v celém odlitku, částečně tekutý zůstává pouze náletek.

6.3.4 Porovnání naměřených teplot s výsledky simulací

Pro posouzení přesnosti predikce teplotního pole odlitku kruhu a výskytu vad bylo provedeno porovnání reálného teplotního pole ve formě s výsledky simulací v programu ProCast. Při tomto porovnání je však nutné uvažovat, že simulovaný odlitek kruhu nebyl velikostně totožný s odlévaným kusem a nebylo použito kontaktního chladiče, ale nekontaktních chladičů (puků).

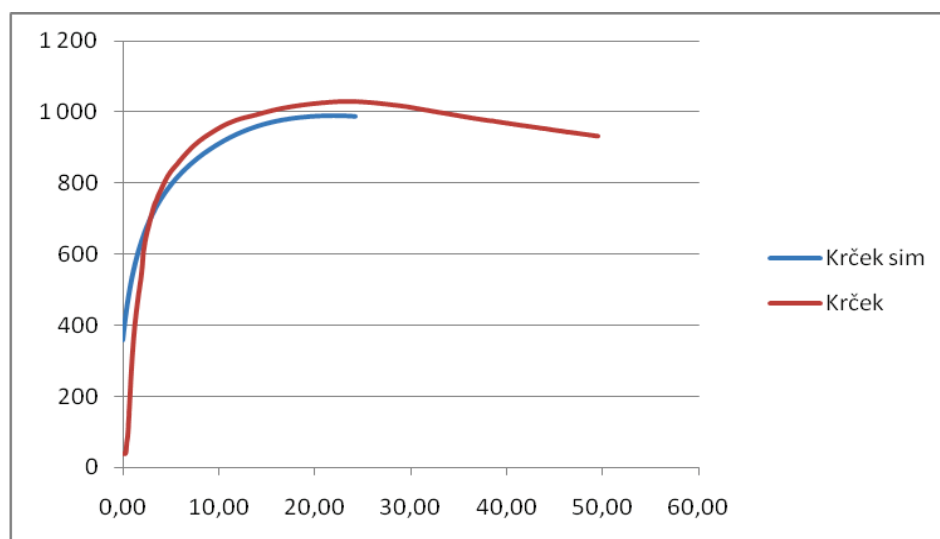
Výsledky porovnání teplot simulované a naměřené teploty na spodní straně odlitku jsou uvedeny v grafu 8. Termočlánek byl vložen mezi nekontaktní chladiče, do vrstvy chromitové formovací směsi v hloubce 100 mm od dna formy. Přestup tepla mezi chladiči a odlitkem je výrazně nižší vlivem vrstvy chromitu, tomuto předpokladu velmi dobře odpovídá průběh křivek.



Graf 8 Porovnání simulované a naměřené teploty u dna odlitku kruhu

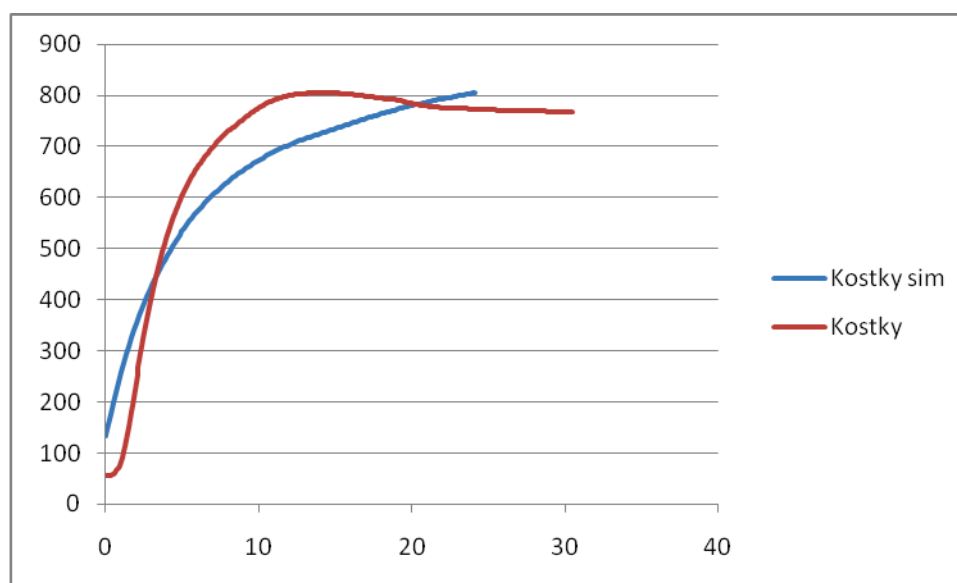
Výsledky porovnání teplot simulované a naměřené teploty v krčku nálitku jsou uvedeny v grafu 9. V místě krčku nastal ve skutečnosti velice strmý nárůst teploty, teplota se přiblížila teplotě 1000 °C po cca 10 hod. Simulace v místě krčku odpovídá velice přesně naměřeným teplotám. Po cca 20 hodinách

začala naměřená teplota pozvolna klesat, což mohlo být způsobeno smrštěním odlitku a ztrátou kontaktu mezi odlitkem - formou a formou - termočlánkem.



Graf 9 Porovnání simulované a naměřené teploty v krčku nálitku u odlitku kruhu

Výsledky porovnání teplot simulované a naměřené teploty na bočním nekontaktním chladítku jsou uvedeny v *grafu 10*. Naměřený průběh teploty za chladítkem vykazuje pomalejší náběh, než simulovaná křivka. Dále ale naměřená křivka roste strměji a v čase 10 hod. dosáhne teploty cca 800 °C. Ve stejném čase vykazuje simulace pouze teplotu cca 700 °C. Simulace za chladicí kostkou přibližně odpovídá naměřenému průběhu teploty.



Graf 10 Porovnání simulované a naměřené teploty na rubové straně tepelné izolace nálitku u odlitku kruhu

6.3.5 Shrnutí výsledků

Výsledky měření teplotního pole jsou velice důležité pro porovnání mezi naměřeným a simulovaným stavem. Teploty v krčku odlitku byly naměřené a simulované výsledky ve velmi dobré shodě. V místě za izolací byly patrné rozdíly mezi simulovaným stavem a naměřenými hodnotami, přesto však byly výsledky v poměrně dobré shodě. U dna odlitku byly zjištěny významné rozdíly. Tyto odchylky byly dané podmínkami simulací (jiný odlitek, jiný přestup tepla odlitek/chladič atd.), ale souvisejí také se změnou podmínek v průběhu chladnutí a tuhnutí.

6.3.6 Zjištěné vady

Na vnějším průměru byly pomocí magnetické zkoušky objeveny dvě oblasti shluků vad. Tyto oblasti o rozměrech cca 150x200 mm byly od sebe vzdáleny 4,2 m po obvodu. Tyto vady byly označeny jako praskliny. Maximální délka byla cca 30 mm a hloubka do 12 mm. Vady byly označeny jako opravitelné. Oblasti byly vybroušeny a zavařeny.

Na spodní ploše odlitku 1 vada - nekovový materiál.

Ultrazvukovou zkouškou nebyly indikovány žádné vady.

6.4 Spotřeba tekutého kovu a vnitřní struktura

6.4.1 Kruh č. 1

odlitek	m_0	136 t
krček+1/3 nálitku	m_k	41 t
2/3 nálitku	m_n	59 t
surová hmotnost	m_{sur}	236 t

Tab. 14 hmotnosti částí kruhu č. 1

$$V_t = m_{sur} / m_0 \times 100 [\%]$$

V_t - využití tekutého kovu

$$V_t = 136/237 \times 100$$

$$V_t = 57 \%$$

6.4.2 Kruhy č. 2,3

odlitek	m_0	136 t
krček+1/3 nálitku	m_k	32 t
2/3 nálitku	m_n	42 t
surová hmotnost	m_{sur}	215 t

Tab. 15 hmotnosti částí kruhu č. 2,3

$$V_t = m_{\text{sur}} / m_0 \times 100 [\%]$$

 V_t - využití tekutého kovu

$$V_t = 136/215 \times 100$$

$$V_t = \mathbf{63 \%}$$

6.4.3 Porovnání vnitřní struktury

U odlitku č. 2, tedy u metody s využitím kontaktních chladičů byl u ultrazvukové zkoušky použit o 6 dB menší příkon ultrazvukových vln než u odlitku č. 3 (odlitku s pukou).

Tato skutečnost svědčí o lepší prozvučitelnosti a tím i o jemnější struktuře kruhu litého s kontaktním chladičem.

7. Závěr

První část práce se zabývá identifikací vad, rozbořem častých vad masivních ocelových odlitků a slévárenskou technologií shodnou pro všechny technologie, jako je příprava formovací směsi, zavedení vtokové soustavy a příprava tekutého kovu.

Nejvýznamnější část práce se zabývá popisem a vzájemným porovnáním tří technologií použitých pro výrobu odlitků nosných kruhů cementářských pecí. První, starší technologie je varianta bez použití chladítek ve spodní části odlitku. Druhé dvě technologie byly nově navrženy a předem testovány v programu ProCAST. Jednalo se o technologie s využitím velmi hmotných kontaktních chladítek (odlitek č.2) a nekontaktních chladítek (odlitek č.3). Dále bylo provedeno měření teplotního pole a jeho srovnání s výsledky získanými ze simulací a výpočet spotřeby tekutého kovu.

U odlitků vyrobených podle technologie bez použití spodního chlazení se vyskytovalo velké množství vad v podnálitkové ploše, také hrozí nebezpečí vzniku osově porezity vlivem málo usměrněného tuhnutí. U této technologie není možné zmenšit nálitek a využití tekutého kovu je přibližně 57%.

U technologie s využitím masivního kontaktního chladítka byl měřením teplotního pole ověřen vhodný gradient teploty a tím snížení nebezpečí vzniku osově porezity. V místě styku chladítka a kovu se vytvořily hluboké trhliny po celé tloušťce odlitku. Tyto trhliny souvisejí se skutečností, že se chladič skládá z mnoha segmentů. Odstranění těchto trhlín je předmětem dalšího zkoumání. U této technologie bylo zmenšením nálitku dosaženo využití tekutého kovu 63%. S ohledem na jistotu dosažení dobrého odlitku nebyly využity všechny možnosti pro snížení spotřeby tekutého kovu. Dále byly odebrány vzorky materiálu z nálitku, pro ověření mechanických vlastností kovu a prozkoumání možnosti dalšího zmenšení nálitku. Technologie nosných kruhů s využitím kontaktního chladiče prozatím není zcela optimalizována, další nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady litých kontaktních chladičů. Do budoucna však tato technologie nabízí největší možnosti dalšího pokroku ve zvýšení využití tekutého kovu a zvýšení vnitřní jakosti odlitků.

U technologie s využitím nekontaktních chladičů (tzv. puků) bylo využití tekutého kovu 63%, stejně jako u odlitku s kontaktním chladítkem. U odlitku litého pomocí této technologie se vyskytly pouze běžné, lehce odstranitelné slévárenské vady. Technologie s využitím nekontaktních chladítek se prozatím ukázala jako nejvhodnější s ohledem na ekonomičnost a možnosti slévárny.

Seznam použitých zdrojů

1. CARBOL, Zdeněk., PLUHÁČEK, Jiří. *Výroční zpráva VHM a.s. Ostrava*: 2010, s. 10
2. Krayzel M., Šeděnka D., Korbáš M., Carbol Z. : Zkušenosti z provozu modernizované EOP v ocelárně VHM, a.s. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2007, 13, s. 349-354. ISSN-1335-1532
3. SMS MEVAC UK - Leading in secondary metallurgy [online]. 2009 [cit. 2011-04-16]. Dostupné z WWW: <http://www.sms-mevac.co.uk/references/references.htm>
4. CHRÁST, Jaroslav. *Slévárenská zařízení*. Vyd. první. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. 256 s. ISBN 80-7204-455-9.
5. ELBEL, T. a kol.: *Vady odlitků ze slitin železa*. 1. vyd. Brno: MATECS, 1992.
6. ELBEL, Tomáš. Vady odlitků : Identifikace vad odlitků a příčin jejich vzniku. *Slévárenství*. 2001, 9, s. 539-543
7. KALANDYK, B; ZAPALA, R; RAKOWSKA, A. *Characteristics of defects present in industrial steel castings due to metal-mould reactions* [online]. [cit. 2011-06-01]. Dostupné z WWW: <http://imim.pl/files/archiwum/Vol2_2009/289.pdf>.
8. JAROSLAV, Šenberger. Výroba nelegovaných ocelí na odlitky v zásaditých obloukových pecích. *Přednášky metalurgie oceli* [online]. 2005, 5, [cit. 2011-06-01]. Dostupný z WWW: <www.zam.fme.vutbr.cz/~senberger/doc/prednaska_5.doc>.
9. SAIP, Jiří; KAŇÁK, Jan. *Stvolové vycezeniny u těžkých ocelových odlitků*. *Slévárenství*. 1984, 10, s. 414-419.
10. KAŇÁK, Jan; SAIP, Jiří. *Způsoby snižování vlivu stvolových vycezenin na jakost ocelových odlitků*. *Slévárenství*. 1984, 10, s. 420-424.
11. HAVLÍČEK, František. Vady odlitků : Vnitřní trhliny a praskliny. *Slévárenství*. 1998, 3-4, s. 109-116.
12. ZÁDĚRA, Antonín; ŠENBERGER, Jaroslav. *Zpráva 1 VHM 2011*. Brno: 2011. s. 6.
13. PLUHÁČEK, Jiří. CARBOL, Zdeněk. *Prezentace nového způsobu výroby nosného kruhu ve VHM a.s.* Ostrava: 2010. s. 16.